

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

y Sistemas de Telecomunicación



TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA DE
LA EDIFICACIÓN Y MEDIO AMBIENTE**

**ANÁLISIS DE LAS CAUSAS DE DISPERSIÓN EN LOS
RESULTADOS DE LAS MEDIDAS DEL COEFICIENTE
DE ABSORCIÓN ACÚSTICA EN CÁMARA
REVERBERANTE**

PATRICIA HRELJA GONZÁLEZ

Julio de 2014



Máster en Ingeniería Acústica de la Edificación y Medio Ambiente

Trabajo Fin de Máster		
Título	Análisis de las causas de dispersión en los resultados de las medidas del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante	
Autor	Patricia Hrelja González	VºBº
Tutor	Juan Sancho Gil	
Ponente		
Tribunal		
Presidente	Danilo Simón Zorita	
Secretario	Jose Luis Sánchez Bote	
Vocal	Lino Pedro García Morales	
Fecha de lectura		
Calificación		

El Secretario: Jose Luis Sánchez Bote

Índice

Índice	i
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	xi
Resumen	xiv
Summary	xv
1 Introducción y objetivos	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Objetivos.	3
1.3. Estructura del trabajo.....	4
2 Medida del coeficiente de absorción acústica según UNE-EN ISO 354:2004	6
2.1. Introducción.....	7
2.2. Términos y definiciones.....	7
2.3. Método de ensayo según UNE-EN ISO 354:2004.	11
2.3.1. Fundamentos del método.....	11
2.3.2. Condiciones de ensayo.....	12
2.3.2.1. Cámara reverberante.....	12
2.3.2.2. Muestra de ensayo.	14
2.3.2.3. Temperatura y humedad relativa.	14
2.3.3. Medición del tiempo de reverberación.....	15

2.3.3.1. Instrumentación.....	15
2.3.3.2. Procedimiento.....	16
2.3.4. Determinación del coeficiente de absorción acústica.....	17
2.3.4.1. Cálculo de los tiempos de reverberación T_1 y T_2	17
2.3.4.2. Cálculo de las áreas de absorción equivalente A_1 , A_2 y A_T	17
2.3.4.3. Cálculo del coeficiente de absorción sonora.....	20
2.4. Aplicación del método de ensayo.....	21
2.4.1. Entorno de medida.....	21
2.4.2. Instrumentación empleada.....	22
2.4.3. Verificación de las condiciones de ensayo.....	23
2.4.3.1. Cámara reverberante.....	23
2.4.3.2. Muestra de ensayo.....	27
2.4.3.3. Temperatura y humedad relativa.....	28
2.4.4. Procedimiento de ensayo.....	28
2.4.4.1. Montaje y colocación de la muestra de ensayo.....	28
2.4.4.2. Medición del tiempo de reverberación.....	29
2.4.5. Resultados obtenidos.....	32
3 Evaluación de la incertidumbre en la medida del coeficiente de absorción acústica.....	37
3.1. Concepto de incertidumbre.....	38
3.2. Métodos de cálculo de la incertidumbre.....	39
3.2.1. Fases principales de la evaluación de la incertidumbre.....	40

3.2.2. Fase de propagación de distribuciones.	41
3.2.3. Enfoque clásico de la GUM. Propagación de incertidumbres.	42
3.2.3.1. Evaluación de la incertidumbre tipo A.	43
3.2.3.2. Evaluación de la incertidumbre tipo B.	44
3.2.3.3. Determinación de la incertidumbre típica combinada.	44
3.2.3.4. Determinación de la incertidumbre expandida.	45
3.2.4. Método de Monte Carlo. Propagación de distribuciones.	46
3.2.4.1. Número M de reiteraciones.	47
3.2.4.2. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.	48
3.2.4.3. Evaluación del modelo.	48
3.2.4.4. Representación discreta de la función de distribución para la magnitud de salida.	48
3.2.4.5. Estimación de la magnitud de salida y de su incertidumbre típica asociada.	49
3.2.4.6. Intervalo de cobertura para una magnitud de salida.	49
3.2.5. Comparación entre el enfoque GUM y el método de Monte Carlo.	50
3.2.6. Validación del enfoque GUM mediante el método de Monte Carlo. Monte Carlo adaptable.	51
3.2.6.1. Método de Monte Carlo adaptable.	51
3.2.6.2. Procedimiento de comparación.	54
3.3. Aplicación del enfoque clásico de la GUM al ensayo.	54
3.3.1. Modelo matemático.	55
3.3.2. Determinación de las fuentes de incertidumbre.	55

3.3.2.1. Evaluación Tipo A de la incertidumbre típica.	56
3.3.2.2. Evaluación Tipo B de la incertidumbre típica.	56
3.3.2.3. Determinación de las incertidumbres típicas combinadas de las magnitudes de entrada.....	57
3.3.2.4. Evaluación de la incertidumbre típica por el Método de Monte Carlo.	57
3.3.3. Cálculo de la incertidumbre combinada.....	60
3.3.4. Cálculo de la incertidumbre expandida.....	62
3.4. Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo.	63
3.4.1. Modelo matemático.....	63
3.4.2. Determinación de las magnitudes de entrada al modelo.	63
3.4.3. Procedimiento adaptable.....	65
3.4.3.1. Tolerancia numérica.	65
3.4.3.2. Número de reiteraciones M	66
3.4.3.3. Aplicación de las M reiteraciones de Monte Carlo.	66
3.4.3.4. Estabilización de los resultados.....	70
3.5. Resultados obtenidos y validación.....	72
4 Estudio de trazado de rayos de la cámara reverberante del CEIS.....	81
4.1. Introducción.....	82
4.2. Construcción del modelo del recinto.	83
4.3. Aplicación del trazado de rayos en la simulación del modelo.....	86
4.3.1. Herramienta Impactos del Trazado de Rayos (<i>Ray Tracing Impacts</i>). 87	

4.3.2. Parámetros a obtener en las simulaciones.....	87
4.3.3. Configuración del trazado de rayos.....	89
4.4. Procesado de los datos mediante Matlab.....	92
4.5. Análisis de los resultados de la simulación una vez procesados en Matlab.....	96
4.5.1. Estudio de la evolución de los rayos y de los caminos medios.....	97
4.5.2. Estudio de la procedencia de los rayos.....	103
5 Conclusiones y futuras líneas de investigación	110
5.1. Conclusiones.....	111
5.2. Futuras líneas de investigación.....	113
ANEXOS	114
ANEXO A Medida del coeficiente de absorción acústica de los difusores.....	115
ANEXO B Evolución de los rayos en los distintos puntos de estudio	117
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

Índice de figuras

Figura 2.1	Absorción del sonido.....	8
Figura 2.2	Cámara reverberante de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM.	21
Figura 2.3	Esquema de montaje.	23
Figura 2.4	Área de absorción sonora equivalente de la cámara en función de la frecuencia.	26
Figura 2.5	Muestra de ensayo colocada en la cámara.	28
Figura 2.6	Montaje y colocación de la muestra de ensayo.	29
Figura 2.7	Proceso de verificación de la constante de tiempo empleada.	31
Figura 2.8	Comparación de los coeficientes de absorción acústica obtenidos en la cámara de la escuela y en la intercomparación AQU-ABSORPTION_1.	35
Figura 2.9	Comparación de la repetibilidad de los resultados obtenidos en la cámara de la escuela y en la intercomparación AQU-ABSORPTION_1.	35
Figura 3.1	Expresión del resultado de una medición. Mensurando con su incertidumbre asociada.....	38
Figura 3.2	Ilustración de la propagación de distribuciones.	42
Figura 3.3	Función de densidad de probabilidad normal de T_1	67
Figura 3.4	Funciones de densidad de probabilidad que afectan a T_1	68
Figura 3.5	Propagación de las distribuciones normal y rectangular.....	68
Figura 3.6	Propagación de distribuciones de las magnitudes de entrada para obtener la FDP del coeficiente de absorción acústica.....	69

Figura 3.7	Representación discreta de la función de distribución de α_s	71
Figura 3.8	Función de densidad de probabilidad de α_s	72
Figura 3.9	Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 1 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.....	78
Figura 3.10	Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 2 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.....	78
Figura 3.11	Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 3 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.....	79
Figura 3.12	Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 4 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.....	79
Figura 3.13	Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 5 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.....	79
Figura 4.1	Modelo original de la cámara reverberante del CEIS.	83
Figura 4.2	Difusores de la cámara reverberante del CEIS.	84
Figura 4.3	Modelo de la cámara reverberante del CEIS usado en el estudio.....	86
Figura 4.4	Configuración de los parámetros resultantes de la simulación para cada rayo.	87
Figura 4.5	Configuración de los parámetros de impactos del trazado de rayos.	89
Figura 4.6	Configuración de los parámetros del trazado de rayos.....	90

Figura 4.7	Ecograma obtenido en la simulación de la cámara vacía con el altavoz $S1$ en el punto $L1$, para un tiempo de 300 ms y orden 50.	91
Figura 4.8	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L1$.	98
Figura 4.9	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ en el punto $L1$ con la muestra en el interior de la cámara en la banda de 315 Hz	99
Figura 4.10	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ en el punto $L1$ con la muestra en el interior de la cámara en la banda de 5000 Hz	100
Figura 4.11	Evolución de los caminos de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L1$.	101
Figura 4.12	Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz $S1$ y que llegan al punto $L1$, con la muestra colocada en el interior de la cámara en la frecuencia de 315 Hz	102
Figura 4.13	Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz $S1$ y que llegan al punto $L1$, con la muestra colocada en el interior de la cámara en la frecuencia de 5000 Hz	102
Figura 4.14	Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz $S1$ y que llegan al punto $L1$, con la cámara vacía en la frecuencia de 5000 Hz	103
Figura 4.15	Superficies de procedencia correspondientes a cada punto de estudio.	109

Figura B.1	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L1$	117
Figura B.2	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S2$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L1$	118
Figura B.3	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L2$	118
Figura B.4	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S2$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L2$	119
Figura B.5	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L3$	119
Figura B.6	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S2$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L3$	120
Figura B.7	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L4$	120
Figura B.8	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S2$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L4$	121
Figura B.9	Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L5$	121

Figura B.10 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S2$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L5$ 122

Figura B.11 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la cámara vacía en el punto $L1$ 123

Índice de tablas

Tabla 2.1	Áreas máximas de absorción sonora equivalente para cámaras de $V = 200 \text{ m}^3$	13
Tabla 2.2	Instrumentación empleada.	22
Tabla 2.3	Áreas de absorción sonora equivalente de la cámara vacía calculadas con el término $4mV$ y valores máximos permitidos para cámaras de $V = 206 \text{ m}^3$	24
Tabla 2.4	Áreas de absorción sonora equivalente de la cámara vacía calculadas sin el término $4mV$ y valores máximos permitidos para cámaras de $V = 206 \text{ m}^3$	25
Tabla 2.5	Máximas diferencias permitidas entre tercios contiguos del área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía.....	27
Tabla 2.6	Repetibilidad de las medidas del tiempo de reverberación usando como señal de excitación MLS.....	30
Tabla 2.7	Tiempos de reverberación de la cámara medidos con y sin el marco en su interior.	32
Tabla 2.8	Valores del coeficiente de absorción acústica obtenido en cada ensayo.	33
Tabla 2.9	Coeficiente de absorción sonora y repetibilidad correspondientes a los ensayos realizados y a la intercomparación AQU-ABSORPTION_1.....	34
Tabla 3.1	Incertidumbres típicas Tipo A de las magnitudes de entrada.....	56
Tabla 3.2	Incertidumbres típicas Tipo B de las magnitudes de entrada.....	57
Tabla 3.3	Magnitudes de entrada y sus FDP asociadas.....	58
Tabla 3.4	Magnitudes de entrada con sus coeficientes de sensibilidad.....	60
Tabla 3.5	Valores de la incertidumbre típica combinada obtenidos para cada ensayo con las 3 magnitudes de entrada y con las 5 magnitudes de entrada. Incluye la variación de las condiciones climáticas.	61

Tabla 3.6	Magnitudes de entrada y sus funciones de densidad de probabilidad.....	64
Tabla 3.7	Resultados obtenidos para el ensayo 1 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.	73
Tabla 3.8	Resultados obtenidos para el ensayo 2 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.	74
Tabla 3.9	Resultados obtenidos para el ensayo 3 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.	75
Tabla 3.10	Resultados obtenidos para el ensayo 4 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.	76
Tabla 3.11	Resultados obtenidos para el ensayo 5 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.	77
Tabla 4.1	Ejemplo de parámetros obtenidos en la simulación de la cámara vacía, con el altavoz $S1$ en el punto $L1$, en 100 Hz	93
Tabla 4.2	Ejemplo de fichero proporcionado por Matlab con los rayos ordenados por orden de llegada al punto $L1$	94
Tabla 4.3	Ejemplo de la información proporcionada por el programa de Matlab en cada ventana temporal de 10 ms	96
Tabla 4.4	Superficies de procedencia del punto $L1$ en cada intervalo temporal.....	104
Tabla 4.5	Superficies de procedencia del punto $L2$ en cada intervalo temporal.....	105

Tabla 4.6	Superficies de procedencia del punto $L3$ en cada intervalo temporal.....	106
Tabla 4.7	Superficies de procedencia del punto $L4$ en cada intervalo temporal.....	107
Tabla 4.8	Superficies de procedencia del punto $L5$ en cada intervalo temporal.....	108
Tabla A.1	Coeficiente de absorción acústica de los difusores de PVC de la cámara de la ETSIST.....	116

Resumen

El objetivo del presente Trabajo Fin de Máster es llevar a cabo un estudio de las causas de la precisión de los resultados de las medidas del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 354 *“Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”*.

En primer lugar, se han estudiado los fundamentos teóricos relacionados con el método de ensayo. A continuación, se ha detallado dicho método y se ha aplicado a un caso práctico con la instrumentación disponible en el laboratorio de Acústica de la Escuela.

Puesto que el resultado de un ensayo únicamente se halla completo cuando está acompañado de una declaración acerca de la incertidumbre de dicho resultado, en el presente trabajo se ha aplicado a este método de ensayo, tanto el enfoque clásico de la GUM, como el método de Monte Carlo, para evaluar la incertidumbre y comparar los resultados obtenidos mediante las dos metodologías.

Para estudiar la influencia que produce en el campo sonoro de una cámara reverberante la introducción de un material absorbente en su interior, se realizó un estudio mediante trazado de rayos de la cámara reverberante del CEIS.

Summary

The objective of this Master's Thesis is to study the causes of accuracy of the measurements results of sound absorption coefficient in a reverberation room, according to the procedure of standard UNE-EN ISO 354 "Measurement of sound absorption in a reverberation room".

Firstly, theoretical basis related to the test method have been studied. Then, this method has been defined and applied to a particular case with the instrumentation available in the Acoustics laboratory of the College.

The test result must be accompanied by a statement of the uncertainty of the result. For this reason, Monte Carlo method and GUM uncertainty framework have been applied in this project for estimating uncertainty and comparing the results obtained by these two methodologies.

In addition, a study was made in the reverberation room of CEIS, by ray tracing, to study the influence on the sound field produced by the introduction of an absorbent material inside of the room.

1

Introducción y objetivos

1.1. Introducción.

El objetivo del acondicionamiento acústico de un recinto es conseguir un grado de difusión acústica uniforme en todos los puntos del mismo, de forma que, un espectador reciba el mensaje transmitido de forma óptima independientemente de su ubicación. Para ello, es fundamental conseguir un equilibrio adecuado entre el sonido directo y el campo sonoro reverberante. Un adecuado acondicionamiento acústico implica que la energía reflejada sea la apropiada, por lo que la capacidad de absorción de los materiales desempeñan un papel importante, ya que minimizarán la reverberación indeseada o ecos que pueden dificultar la inteligibilidad de la comunicación sonora. El grado de absorción del sonido de un material se expresa mediante el coeficiente de absorción acústica (α) en función de la frecuencia. Basándose en este parámetro, se decide qué materiales son más adecuados para realizar el tratamiento acústico de las paredes interiores de un recinto. Por tanto, a la hora de realizar un proyecto de acondicionamiento acústico, es imprescindible conocer previamente el coeficiente de absorción acústica de los materiales a emplear en el acondicionamiento.

Actualmente, existen distintos métodos para la medición del coeficiente de absorción acústica de un material. En el diseño acústico de salas, el método utilizado y en el cual se centra el presente trabajo, es el de la medida del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 *“Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”*. Este método es el único estandarizado que permite ensayar un material en situaciones en las que el sonido incide desde cualquier dirección.

Un método de ensayo se debe caracterizar por su precisión, que se define como el grado de concordancia entre los resultados obtenidos al aplicar el mismo proceso experimental repetidas veces, a un mismo objeto, o objetos similares, bajo condiciones especificadas. Los datos de precisión de un método de ensayo sirven de referencia a los laboratorios para poder evaluar su propia precisión del método de ensayo. Los mejores datos de precisión se obtienen participando en los ejercicios de intercomparación. Estos ejercicios consisten en la evaluación mediante mediciones o ensayos sobre el mismo ítem, o ítems similares, por dos o más laboratorios de acuerdo con condiciones predeterminadas. Además, los ejercicios de intercomparación son una herramienta fundamental empleada para mantener y

demostrar la competencia técnica de los laboratorios, y mejorar el conocimiento del estado del arte en la aplicación del método de ensayo bajo estudio.

La precisión de la norma UNE-EN ISO 354:2004 está aún bajo investigación. Hasta ahora, la mayoría de los ensayos interlaboratorios han proporcionado una gran variabilidad en los resultados del cálculo, obteniendo una gran diferencia entre mediciones de la absorción acústica de los laboratorios en cámara reverberante. Las diferencias entre los resultados de los laboratorios son mucho más grandes de los que se puede aceptar, tanto desde un punto de vista práctico para predicciones, como desde un punto de vista jurisdiccional. Se sabe que la insuficiencia de difusión en el campo sonoro de la cámara reverberante una vez introducida la muestra de ensayo, la forma de la cámara reverberante y la colocación de los difusores influyen en los resultados del método. Por este motivo, un grupo de trabajo ISO ha empezado a investigar posibles mejoras del método, como puede ser el uso de un material de referencia o la corrección del camino libre medio de la cámara [12].

En cualquier caso, de la experiencia reciente en este campo, resulta evidente que el procedimiento realizado para el cálculo del coeficiente de absorción en cámara reverberante necesita someterse a un severo estudio, con el fin de disminuir las discrepancias entre los resultados de las mediciones dentro de las cámaras. Puesto que después de más de 100 años, aún no se sabe calcular el coeficiente de absorción de incidencia aleatoria real de un absorbente [13].

1.2. Objetivos.

El objetivo principal del presente trabajo es llevar a cabo un estudio de las causas de dispersión en los resultados de las medidas del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN ISO 354.

A partir del mencionado objetivo general, los objetivos específicos que este Trabajo Fin de Máster pretende conseguir son:

- Afianzar los conocimientos sobre este método de ensayo para poder aplicarlo correctamente.
- Analizar si la cámara reverberante de la ETSIST resulta adecuada para la aplicación del método de ensayo.

- Aplicar una metodología rigurosa para estimar la incertidumbre asociada al resultado de un ensayo empleando, tanto el enfoque clásico de la GUM como el método de Monte Carlo.
- Validar los resultados obtenidos por el enfoque clásico de la GUM mediante el método de Monte Carlo.
- Estudiar, mediante trazado de rayos, cómo la introducción de un material absorbente en una cámara reverberante produce cambios en la propagación de las ondas sonoras en su interior.

1.3. Estructura del trabajo.

Para conseguir los objetivos anteriormente mencionados, se ha optado por estructurar este trabajo en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1. Introducción y objetivos.
- Capítulo 2. Medida del coeficiente de absorción acústica según UNE-EN ISO 354.
- Capítulo 3. Evaluación de la incertidumbre en la medida del coeficiente de absorción acústica.
- Capítulo 4. Estudio de trazado de rayos de la cámara reverberante del CEIS.
- Capítulo 5. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

A continuación, se describen brevemente:

En el capítulo 1 se introduce el tema del trabajo y se relatan los objetivos del mismo.

El capítulo 2 se centra en la medida del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, mediante el método descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004. En primer lugar, se exponen los fundamentos teóricos relacionados con el método de ensayo. A continuación, se detalla el método de ensayo, y por último, se aplica el método a un caso práctico con la instrumentación disponible en el laboratorio de Acústica de la Escuela.

En el capítulo 3 se ilustra la metodología para evaluar la incertidumbre de medida empleando, tanto el enfoque clásico de la GUM, como el método de Monte Carlo, descrito en el Suplemento 1 de la guía GUM. Ambas metodologías se aplican al método de ensayo bajo estudio, con el fin de estimar la incertidumbre asociada al coeficiente de absorción acústica determinado en un ensayo, y comparar los resultados obtenidos mediante las dos metodologías.

En el capítulo 4 se estudia, mediante simulaciones de trazado de rayos, la influencia que produce en el campo sonoro de una cámara reverberante, la introducción de un material absorbente en su interior.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones obtenidas tras la realización del trabajo y se proponen una serie de futuras líneas de investigación en las que seguir trabajando en este ámbito.

Además, el trabajo incluye los siguientes ANEXOS:

- ANEXO A: Medida del coeficiente de absorción acústica de los difusores.
- ANEXO B: Evolución de los rayos en los distintos puntos de estudio.

2

Medida del coeficiente de absorción acústica según UNE-EN ISO 354:2004

2.1. Introducción.

El coeficiente de absorción acústica es un parámetro indispensable a la hora de acondicionar, o aislar, acústicamente un local; puesto que permite caracterizar el grado de absorción de los materiales absorbentes a utilizar en el tratamiento acústico de los recintos.

Existen distintos métodos para la medición del coeficiente de absorción acústica de un material. En ciertas ocasiones, se necesita entender y modelar los materiales, realizando las medidas en condiciones definidas y controladas; por tanto, se emplea el método del tubo de impedancia, descrito en la norma UNE-EN ISO 10534:2002 *“Determinación del coeficiente de absorción acústica y de la impedancia acústica en tubos de impedancia”*. Este método permite determinar, para incidencia normal (incidencia perpendicular del sonido a la superficie del material), tanto el coeficiente de absorción acústica como la impedancia. Únicamente necesita pequeñas muestras de unos pocos centímetros de diámetro, lo que hace que sea ideal para investigación de nuevos materiales, sin embargo, el coeficiente de absorción de una pequeña muestra puede no ser representativo de una muestra grande. En el diseño acústico de salas, el método utilizado es el de la medida del coeficiente de absorción en cámara reverberante, descrito en la norma UNE-EN ISO 354:2004 *“Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”*, ya que es el único método estandarizado que permite ensayar áreas grandes de muestras de material bajo incidencia difusa; es decir, para situaciones en las que el sonido incide desde cualquier dirección, asemejándose más a una situación real del campo sonoro en una sala, que la obtenida en el interior del tubo.

En el presente proyecto se llevaron a cabo las medidas del coeficiente de absorción acústica bajo el método de la cámara reverberante.

2.2. Términos y definiciones.

Absorción acústica: la propagación del sonido en recintos cerrados se ve influenciada por la presencia de las superficies que los limita. Cuando una onda sonora choca contra una de las superficies de una habitación, parte de la energía de la onda sonora (E_{inc}) se refleja (E_{ref}), otra parte es absorbida (E_{abs}) convirtiéndose en energía calorífica en el material, y la parte restante traspasa el material (E_{tra}). El nivel de energía convertido en energía calorífica depende de las propiedades absorbentes

de sonido del material que se cuantifican mediante el coeficiente de absorción, α , en función de la frecuencia de la onda sonora.

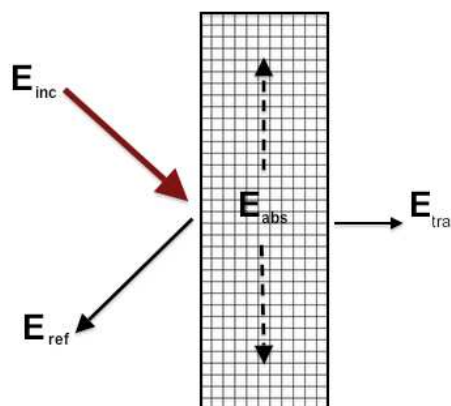


Figura 2.1 Absorción del sonido.

Coeficiente de absorción acústica α : se define como la relación entre la energía acústica absorbida y la energía incidente sobre un material por unidad de superficie.

$$\alpha = \frac{E_{abs}}{E_{inc}} \quad (1)$$

El coeficiente de absorción de un material, depende de la naturaleza del mismo, de la frecuencia de la onda sonora y del ángulo con el que incide la onda sobre la superficie. El coeficiente oscila entre 1, que indica que toda la energía acústica incidente es absorbida, y 0, que representa que toda la energía acústica es reflejada.

Cuando el coeficiente de absorción se obtiene para incidencia aleatoria, en cámaras reverberantes, el resultado se considera que es un valor medio para todos los ángulos de incidencia. Puede suceder que mediante este procedimiento se obtengan coeficientes de absorción que superen la unidad, lo que físicamente no debería ocurrir. La razón de esto, se debe al tamaño finito de las muestras y a las distribuciones de intensidad no uniforme en las cámaras. En los bordes del material de espesor finito se pueden producir siempre efectos de difracción, provocándose una concentración o aumento de presión acústica en las cercanías de estos bordes cuando se cubren con un material que refleja el sonido. De esta manera se miden coeficientes de absorción ligeramente mayores a los que realmente existen [12].

Reverberación: Cuando en una sala se apaga repentinamente una fuente sonora, la densidad de energía sonora no desaparece instantáneamente, sino que va disminuyendo gradualmente, de acuerdo al volumen de la sala y sus características absorbentes. Este fenómeno se conoce como reverberación. Auditivamente se caracteriza por una ligera permanencia del sonido una vez que se ha extinguido el original debido a la reflexión que se produce en un recinto cuando un frente de ondas incide contra las paredes, suelo y techo del mismo. La zona en la que se percibe el sonido formado por las reflexiones del recinto se denomina **campo reverberante**. El parámetro que permite cuantificar el grado de reverberación de una sala es el tiempo de reverberación.

Tiempo de reverberación T : se define como el tiempo requerido, después de cesar la fuente sonora, en reducir la energía en una sala a la millonésima parte de su valor inicial, o lo que es lo mismo, el tiempo que tarda el sonido en atenuarse 60 dB a partir del momento en que se apaga la fuente.

La expresión más conocida y utilizada es la fórmula de Sabine, desarrollada por el físico Wallace Clement Sabine a partir de trabajos experimentales realizados entre finales del siglo XIX y principios del siglo XX. Estos trabajos le indujeron a formular una ecuación empírica que describe la relación entre el volumen del recinto V , la absorción total existente en el mismo A y el tiempo de reverberación T , bajo el supuesto de que el campo en el recinto es difuso:

$$T = 0,161 \frac{V}{A} \quad (2)$$

La ecuación 2 no tiene en cuenta la absorción sonora del aire. Este efecto se refleja añadiendo a dicha ecuación el término $4mV$ en el denominador, donde m es la constante de atenuación del aire y V el volumen de la sala, quedando la ecuación 2 de la forma:

$$T = 0,161 \frac{V}{A + 4mV} \quad (3)$$

Campo difuso: un campo acústico es difuso cuando la densidad de energía es uniforme y todas las direcciones de propagación dentro de la sala son igualmente probables. En otras palabras, es un campo acústico donde tanto el nivel en los distintos puntos del espacio como las direcciones de incidencia tienen una distribución uniforme.

Un campo sonoro difuso ideal ocurre solo en la teoría, las salas reales presentan ciertas desviaciones respecto al ideal, pero una aproximación de este campo se obtiene en las cámaras reverberantes ajustadas.

Estado estacionario: Cuando una fuente sonora comienza a irradiar energía acústica en un recinto cerrado, el campo acústico resultante, empieza propagándose libremente. Después de un cierto tiempo, las ondas acústicas comienzan a sufrir reflexiones al incidir sobre los distintos cerramientos, superponiéndose las ondas incidentes con las reflejadas. Este proceso de reflexión se va repitiendo continuamente, pero debido a la absorción de la sala llega un momento en que se igualan la energía absorbida y la emitida por la fuente, permaneciendo estacionaria la energía en la sala. En ese momento, la energía acústica dentro de la sala permanece constante. La potencia radiada por la fuente sirve solo para compensar las pérdidas.

Curva de caída de nivel: Representación gráfica de la caída del nivel de presión sonora en un recinto en función del tiempo después de que cese la emisión de la fuente sonora. El decrecimiento se puede medir tras la interrupción de la fuente acústica continua en el recinto, o bien a partir de la integración inversa del cuadrado de la respuesta impulsiva del recinto.

Método de la señal de ruido interrumpida: Método para obtener las curvas de caída de nivel mediante el registro directo de la caída del nivel de presión acústica, tras la excitación de un recinto con ruido de banda ancha, o ruido limitado en frecuencia.

Método de la respuesta impulsiva integrada: Método para obtener las curvas de caída de nivel mediante la integración inversa en el tiempo de las respuestas impulsivas cuadráticas.

Área de absorción sonora equivalente de un recinto: Área hipotética, expresada en metros cuadrados, de una superficie totalmente absorbente sin efectos de difracción que, si fuera el único elemento absorbente en el recinto, tendría el mismo tiempo de reverberación que el recinto considerado. Para la cámara reverberante vacía, esta magnitud se representa por A_1 ; para la cámara reverberante con la muestra se representa por A_2 .

Área de absorción sonora equivalente de la muestra de ensayo A_T :

Diferencia entre las áreas de absorción sonora equivalente de la cámara reverberante con y sin la muestra de ensayo.

Área de la muestra de ensayo S : Área de suelo o pared, en metros cuadrados, cubierta por la muestra de ensayo.

2.3. Método de ensayo según UNE-EN ISO 354:2004.

En este apartado se describen las directrices de la norma internacional UNE-EN ISO 354:2004 “Acústica. *Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante*” que especifica un método de medición del coeficiente de absorción sonora de materiales acústicos empleados como tratamientos de paredes o de techos, o el área de absorción sonora equivalente de objetos, tales como muebles, personas o absorbentes volumétricos, en una cámara reverberante. Esta norma tiene como propósito promover la uniformidad entre métodos y condiciones de medición de la absorción sonora en cámaras reverberantes.

2.3.1. Fundamentos del método.

Cuando en el interior de un recinto se encuentra una fuente sonora emitiendo, tanto el nivel que alcanza el sonido reverberante como la caída de nivel tras el cese de la emisión de la fuente, están condicionados por las características de absorción sonora de las superficies, del aire y de los objetos en su interior.

Para poder relacionar el tiempo de reverberación de una sala con la reducción de nivel debida a un tratamiento absorbente es preciso conocer las características de absorción sonora de las superficies. Como la energía sonora incidente absorbida en una superficie depende del ángulo de incidencia, la absorción de las superficies se expresa normalmente en forma de un promedio entre todos los ángulos de incidencia. En los recintos habituales la distribución de las ondas sonoras incluye un amplio y altamente impredecible rango de ángulos de incidencia, por lo que es conveniente considerar una distribución uniforme como base para la estandarización. Si, además, el nivel de presión sonora es independiente de la posición dentro del recinto, se dice que el campo sonoro es difuso y que el sonido incide en las superficies de forma aleatoria.

Las cámaras reverberantes son recintos especialmente diseñados para la obtención de un campo sonoro difuso en su interior. La construcción de cámaras con forma irregular, con cada una de las superficies de diferentes dimensiones e inclinaciones, y el uso de difusores, evitan la concentración de energía en alguna zona de la cámara. Además, que las superficies interiores sean sumamente reflectantes para reflejar el sonido incidente, también ayudan a conseguir el objetivo de difusión. Por lo tanto, la absorción sonora de un material medida en una cámara reverberante se aproxima a la absorción que se mediría bajo circunstancias básicas de normalización y por ello se emplean este tipo de recintos para la medición del coeficiente de absorción acústica.

Para ello se mide el tiempo de reverberación promedio en la cámara reverberante, con y sin muestra de ensayo, en las bandas de tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz. A partir de estos tiempos de reverberación, se calcula el área de absorción sonora equivalente A_T por medio de la ecuación de Sabine, ecuación 3. En el caso de muestras que cubren uniformemente una superficie (absorbentes planos), el coeficiente de absorción sonora se obtiene dividiendo A_T por el área S de la superficie tratada.

2.3.2. Condiciones de ensayo.

La norma internacional especifica las condiciones de medición de la absorción sonora de materiales acústicos que deben cumplir la cámara reverberante, la muestra de ensayo y las condiciones ambientales durante el ensayo, para garantizar la uniformidad entre métodos.

2.3.2.1. Cámara reverberante.

De acuerdo a la norma, el volumen de la cámara reverberante debe ser, al menos, de 150 m^3 , y en caso de cámaras de nueva construcción, se recomienda un volumen de 200 m^3 como mínimo. En cámaras con un volumen mayor de 500 m^3 puede perderse precisión en la medida de la absorción en alta frecuencia debido a la elevada influencia de la absorción del aire.

La forma de la cámara reverberante debe cumplir la siguiente condición

$$I_{m\acute{a}x} < 1,9V^{1/3} \quad (4)$$

donde

$I_{m\acute{a}x}$ es la longitud del mayor segmento recto inscrito en la cámara en metros;

V es el volumen de la cámara en metros cúbicos.

Además, con objeto de conseguir una distribución uniforme de frecuencias propias en el recinto, especialmente en baja frecuencia, las dimensiones de la cámara no pueden ser múltiplos entre sí. De esta forma se consigue evitar las concentraciones de energía en las bandas de frecuencias de estudio.

El campo sonoro en la cámara durante la caída del nivel sonoro debe ser suficientemente difuso. Para conseguir una difusión satisfactoria, independientemente de la forma de la cámara, se requiere el uso de difusores suspendidos, fijos o giratorios.

El área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía A_1 , calculada según la ecuación 5, en las bandas de tercio de octava, no debe superar los valores dados en la Tabla 2.1.

Frecuencia [Hz]	100	125	160	200	250	315	400	500	630
Área de absorción sonora equivalente [m ²]	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5

Frecuencia [Hz]	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Área de absorción sonora equivalente [m ²]	6,5	7,0	7,5	8,0	9,5	10,5	12,0	13,0	14,0

Tabla 2.1 Áreas máximas de absorción sonora equivalente para cámaras de
 $V = 200 \text{ m}^3$.

Los valores de la Tabla 2.1 se aplican a cámaras 200 m^3 , por lo que si el volumen de la cámara difiere de 200 m^3 , dichos valores deben multiplicarse por el factor $(V / 200)^{2/3}$.

La gráfica del área de absorción sonora equivalente de la cámara en función de la frecuencia debe mostrar una curva lisa y no presentar baches ni picos que difieran más del 15 % de la media de los valores de los tercios de octava contiguos.

2.3.2.2. Muestra de ensayo.

En cuanto a la elaboración de la muestra de ensayo de absorbentes planos, el área elegida depende del volumen de la cámara y de la capacidad de absorción del material de la muestra. La muestra de ensayo debe tener un área entre 10 m^2 y 12 m^2 , viéndose incrementado el límite superior del área en el factor $(V / 200)^{2/3}$ para cámaras de volumen superior a 200 m^3 . Cuanto mayor sea la cámara, mayor debe ser la superficie de la muestra. Para muestras con bajos coeficientes de absorción, se debe elegir el área de superficie límite superior. Además, la muestra de ensayo debe tener forma rectangular con una relación anchura/largo entre 0,7 y 1.

La muestra debe colocarse de forma que ninguna parte diste menos de 1 m de las aristas de la cámara, o al menos $0,75 \text{ m}$, y preferiblemente sin que los bordes de la muestra se coloquen paralelos a la arista más próxima de la cámara.

Las propiedades de absorción sonora de un material dependen de cómo se monta el material durante el ensayo, por este motivo, la muestra de ensayo debe instalarse de acuerdo con alguno de los diferentes montajes normalizados que la norma establece en su anexo B, a menos que el fabricante requiera especificaciones particulares o que los detalles de aplicación exigidos por los clientes sean diferentes.

2.3.2.3. Temperatura y humedad relativa.

Las variaciones en temperatura y humedad relativa que tengan lugar durante el transcurso de una medición pueden afectar al tiempo de reverberación medido, especialmente en altas frecuencias y con humedades relativas del aire bajas.

Las mediciones del tiempo de reverberación deben realizarse tanto con la cámara vacía, como con la cámara conteniendo la muestra de ensayo, bajo condiciones de temperatura y humedad relativa que no difieran significativamente durante el transcurso del ensayo. En cualquier caso, la humedad relativa de la cámara debe ser como mínimo 30 % y como máximo 90 %, y la temperatura debe ser por lo menos de $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ durante todo el ensayo. En todas las mediciones deben aplicarse las correcciones debidas al cambio de absorción en el aire, cuantificado a partir de las ecuaciones de la Norma ISO 9613-1:1993.

Además, se debe permitir que la muestra de ensayo alcance el equilibrio con la temperatura y la humedad relativa de la cámara antes de realizar los ensayos, dejando la muestra en el interior de la cámara unos minutos antes de comenzar las medidas.

2.3.3. Medición del tiempo de reverberación.

La norma UNE-EN ISO 354 describe dos métodos de medida de las curvas de caída de nivel:

- El método de la señal de ruido interrumpida: es el resultado de un proceso estadístico y es obligatorio promediar varias curvas de caída o tiempos de reverberación, medidos en una posición de altavoz y micrófono, para obtener una repetibilidad adecuada.
- El método de la respuesta impulsiva integrada: es una función determinista y no está sujeta a desviaciones estadísticas, por lo que no es necesario promediar. Sin embargo, requiere una instrumentación y un procesamiento de datos más sofisticados.

Sin embargo, para medir el tiempo de reverberación en los ensayos realizados en este proyecto, se hizo uso de otro método de medida equivalente a la aplicación del método de la respuesta al impulso. Este método emplea como señal de excitación una señal MLS. El procedimiento seguido se describe en el apartado 2.3.3.2. “Procedimiento”.

2.3.3.1. Instrumentación.

Micrófonos. La característica directiva de los micrófonos empleados para las mediciones debe ser omnidireccional.

Fuente sonora. El campo sonoro en la cámara reverberante debe generarse con una fuente sonora con patrón de radiación omnidireccional.

Sistema de adquisición. El sistema de adquisición debe consistir en un detector de nivel o cualquier otro sistema adecuado para determinar la pendiente promedio de la curva de caída y el correspondiente tiempo de reverberación, incluyendo los necesarios amplificadores y filtros.

La instrumentación para la obtención del registro de la caída del nivel de presión sonora debe emplear uno de los siguientes dispositivos:

- Promediador exponencial, que proporciona una sucesión de puntos de muestreo discretos como señal de salida.
- Promediador lineal, que proporciona una sucesión de promedios lineales discretos como salida.

El tiempo de promediado (o constante de tiempo) de un instrumento depende de si el equipo realiza un promediado lineal o exponencial. Para equipos de promediado exponencial, el tiempo de promediado debe ser menor que, y lo más próximo posible a, $T/20$, y para equipos de promediado lineal debe ser menor que $T/12$.

2.3.3.2. Procedimiento.

Las mediciones deben realizarse con diferentes posiciones de micrófonos que disten por lo menos 1,5 *m* entre ellas, 2 *m* de cualquier fuente sonora y 1 *m* de cualquier superficie de la cámara y de la muestra de ensayo. Las curvas de caída de nivel medidas en diferentes posiciones de micrófono no deben combinarse de ninguna manera. También deben emplearse diferentes posiciones de fuente sonora que disten por lo menos 3 *m*.

El número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes debe ser como mínimo 12; es decir, el número de posiciones de micrófono por el número de posiciones de fuente sonora empleados, debe ser al menos 12. Para determinar el número de posiciones de micrófono y fuente, se debe tener en cuenta que el número mínimo de posiciones de micrófono debe ser tres y el número mínimo de posiciones de fuente debe ser al menos dos. Se permite emplear más de una fuente sonora simultáneamente si la diferencia en la potencia radiada entra dentro de una tolerancia de 3 *dB* para cada banda de tercio de octava. Si se emplea más de una fuente sonora para excitar simultáneamente la cámara, el número de curvas de caída de nivel medidas en posiciones diferentes puede reducirse a seis.

La señal de excitación debe ser lo suficientemente larga como para que el campo acústico alcance el estado estacionario en todas las bandas de frecuencia de interés antes de ser interrumpida. Para obtener condiciones de campo estacionario, el tiempo de excitación debe ser al menos la mitad del tiempo de reverberación esperado. La utilización de la señal MLS como señal de excitación es equivalente a obtener la respuesta al impulso. Debido a su naturaleza determinista, las desviaciones estadísticas entre medidas en el mismo punto son muy bajas, lo que evita tener que

promediar varios tiempos de reverberación medidos en la misma posición de altavoz-micrófono. El margen de evaluación de las curvas de caída de nivel de cada banda de frecuencia debe ser de 20 dB.

2.3.4. Determinación del coeficiente de absorción acústica.

2.3.4.1. Cálculo de los tiempos de reverberación T_1 y T_2 .

El tiempo de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencia se expresa por la media aritmética del total de mediciones de tiempo de reverberación realizadas en cada banda.

2.3.4.2. Cálculo de las áreas de absorción equivalente A_1 , A_2 y A_T .

El área de absorción sonora equivalente, A_1 , en metros cuadrados, de la cámara reverberante vacía, debe calcularse utilizando la fórmula:

$$A_1 = \frac{55,3V}{cT_1} - 4Vm_1 \quad (5)$$

donde

V es el volumen, en metros cúbicos, de la cámara reverberante vacía;

c es la velocidad de propagación del sonido en el aire, en metros por segundo.

Para temperaturas en el rango de 15 °C a 30 °C, c puede calcularse mediante la siguiente fórmula:

$$c = (331 + 0,6t / ^\circ C) \quad (6)$$

donde t es la temperatura del aire, en grados centígrados.

T_1 es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante vacía;

m_1 es el coeficiente de atenuación sonora, en metros recíprocos, calculado de acuerdo con la Norma Internacional ISO 9613-1 empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición. El valor de m puede calcularse de acuerdo con la fórmula:

$$m = \frac{\alpha}{10 \lg(e)} \quad (7)$$

donde α es el coeficiente de atenuación empleado en la Norma Internacional 9613-1 y calculado mediante las siguientes ecuaciones:

$$C = -6,8346 \left(\frac{T_{01}}{T} \right)^{1,261} + 4,6151 \quad (8)$$

donde

T_{01} es la temperatura isotérmica del punto triple, en grados Kelvin, 273,16 °K ;

T es la temperatura, en grados Kelvin, medida durante el ensayo.

$$\left(\frac{p_{sat}}{p_r} \right) = 10^C \quad (9)$$

donde

p_{sat} es la presión de saturación del vapor de agua, en kilopascales;

p_r es la presión atmosférica de referencia, en kilopascales, 101,325 kPa ;

C es el término calculado mediante la ecuación 8.

$$h = h_r \left(\frac{p_{sat}}{p_r} \right) \left(\frac{p_r}{p_a} \right) \quad (10)$$

donde

h_r es la humedad relativa, en tanto por ciento, medida durante el ensayo;

p_a es la presión atmosférica, en kilopascales, medida durante el ensayo.

$$f_{rN} = \frac{p_a}{p_r} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/2} \left(9 + 280he^{\left\{ -4,170 \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^{-1/3} - 1 \right] \right\}} \right) \quad (11)$$

donde

T_0 es la temperatura de referencia, en grados Kelvin, 293,15 °K ;

h es la concentración molar de vapor de agua en la atmósfera, calculado mediante la ecuación 10.

$$f_{rO} = \frac{p_a}{p_r} \left(24 + 4,04 \times 10^4 h \frac{0,02 + h}{0,391 + h} \right) \quad (12)$$

$$A = \left\{ 0,01275 \left[e^{\left(\frac{-2239,1}{T} \right)} \right] \left[f_{rO} + \left(\frac{f^2}{f_{rO}} \right) \right]^{-1} + 0,1068 \left[e^{\left(\frac{-3352,0}{T} \right)} \right] \left[f_{rN} + \left(\frac{f^2}{f_{rN}} \right) \right]^{-1} \right\} \quad (13)$$

donde

f es la frecuencia central de la banda de tercio de octava, en hercios;

f_{rO} es la relajación molecular del oxígeno, calculada mediante la ecuación 12;

f_{rN} es la relajación molecular del nitrógeno, calculada mediante la ecuación 11;

$$\alpha = 8,686 f^2 \left[1,84 \times 10^{-11} \left(\frac{p_a}{p_r} \right)^{-1} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{T}{T_0} \right)^{-5/2} \times A \right] \quad (14)$$

donde

f es la frecuencia central de la banda de tercio de octava, en hercios;

A es el término calculado mediante la ecuación 13.

El área de absorción sonora equivalente, A_2 , en metros cuadrados, de la cámara reverberante conteniendo la muestra, debe calcularse utilizando la fórmula:

$$A_2 = \frac{55,3V}{cT_2} - 4Vm_2 \quad (15)$$

donde

V , c y m_2 tienen el mismo significado que en la ecuación 5;

T_2 es el tiempo de reverberación, en segundos, de la cámara reverberante con la muestra de ensayo;

El área de absorción sonora equivalente A_T , en metros cuadrados, de la muestra, debe calcularse utilizando la fórmula:

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1) \quad (16)$$

donde

c_1 es la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura t_1 ;

c_2 es la velocidad de propagación del sonido en el aire a la temperatura t_2 ;

A_1, V, T_1 y m_1 tienen el mismo significado que en la ecuación 5;

A_2, V, T_2 y m_2 tienen el mismo significado que en la ecuación 15.

2.3.4.3. Cálculo del coeficiente de absorción sonora.

El coeficiente de absorción sonora α_s de un absorbente plano debe calcularse mediante la fórmula:

$$\alpha_s = \frac{A_T}{S} \quad (17)$$

donde

A_T es el área de absorción sonora equivalente, en metros cuadrados, calculada de acuerdo a la ecuación 16;

S es el área, en metros cuadrados, de la muestra de ensayo.

2.4. Aplicación del método de ensayo.

El objeto de ensayo es la determinación del coeficiente de absorción sonora de una muestra del material lana de roca a partir del tiempo de reverberación promedio medido, con y sin muestra de ensayo, en la cámara reverberante de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

Para ello se realizaron 5 ensayos independientes siguiendo el procedimiento anteriormente explicado de la norma UNE-EN ISO 354:2004. *Acústica. Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante.*

2.4.1. Entorno de medida.

La cámara reverberante de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM tiene un volumen de 206 m^3 distribuidos en dos espacios diferenciados que se comunican como muestra la Figura 2.2.



Figura 2.2 Cámara reverberante de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM.

El motivo de la distribución de la cámara se debe a que se diseñó para la realización de ensayos de aislamiento acústico, en los que se requieren una sala emisora y otra receptora. Aunque la norma no especifica la forma que debe tener la cámara reverberante, sí especifica que el campo sonoro en el interior debe ser suficientemente difuso, y en este caso, las paredes que separan ambas salas dificultan la distribución uniforme del campo sonoro en todo el espacio. Además, también obstaculizan el posicionado de la muestra en su interior, dejando poco margen de trabajo, lo que obliga a incumplir el requerimiento de la norma de no colocar la muestra a menos de $0,75\text{ m}$, ni en paralelo, de las aristas de la cámara.

2.4.2. Instrumentación empleada.

En la Tabla 2.2 se detalla la información referente a la instrumentación empleada para la realización de las medidas del tiempo de reverberación.

Equipo	Marca	Modelo	Nº de serie
Micrófono prepolarizado de campo libre	G.R.A.S.	40AE	17691
Preamplificador	G.R.A.S.	26AK	19535
Calibrador	Álava Ingenieros	Cal01	11565
Fuente sonora omnidireccional	Álava ingenieros	AVM DO-12	2059
Amplificador de potencia	InterM	M700	010326305
Sistema de análisis	01dB	Symphonie	943
Medidor de condiciones ambientales	VELOCICALC Plus	8386A	54120572
Pie de micro			
Cinta métrica			
PC			

Tabla 2.2 Instrumentación empleada.

Además de la instrumentación mostrada en la Tabla 2.2, fue necesario el uso del software dBati32, desarrollado por el equipo de 01dB, empleado conjuntamente con la unidad de adquisición Symphonie, para medir el tiempo de reverberación en la cámara. Además, el software incorpora un generador de ruido necesario para excitar el altavoz en el interior de la sala.

El diagrama de montaje es el mostrado en la Figura 2.3.

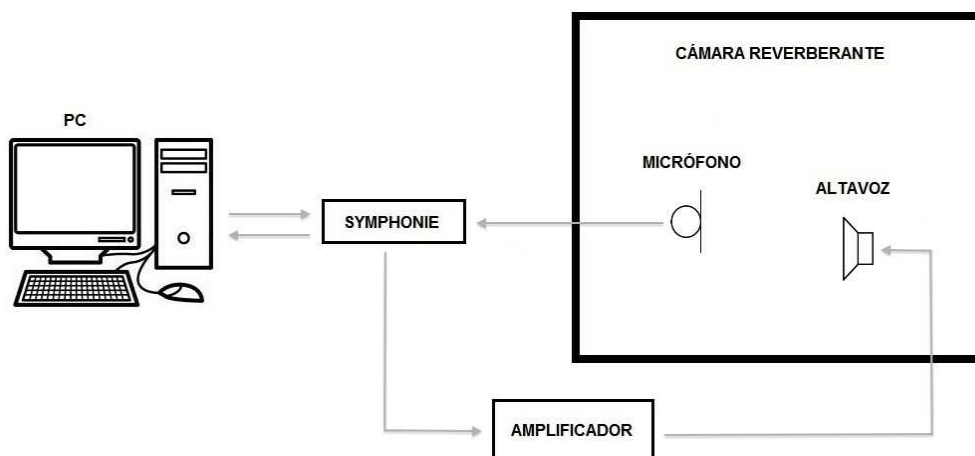


Figura 2.3 Esquema de montaje.

2.4.3. Verificación de las condiciones de ensayo.

2.4.3.1. Cámara reverberante.

De acuerdo a la norma “*el volumen de la cámara debe ser, al menos, 150 m^3* ”, especificación que cumple la cámara, ya que tiene un volumen de 206 m^3 . Sin embargo, la forma no cumple la condición dada en la ecuación 4, ya que la longitud del mayor segmento de recta inscrito en la cámara, $l_{\text{máx}}$, es igual a $12,82 \text{ m}$, valor superior al factor $1,9 \cdot 206^{1/3}$, que es igual a $11,22 \text{ m}$.

Para conseguir una difusión satisfactoria en la cámara durante la caída del nivel sonoro, la cámara dispone de diecinueve difusores suspendidos de PVC, de diferentes tamaños, y distribuidos por todo el volumen, ligeramente curvados y orientados al azar.

Para comprobar si el área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía, A_1 , calculada según la ecuación 5, no superaba los valores exigidos por la norma en todo el margen de frecuencia, se adaptaron los valores de las áreas máximas de absorción sonora equivalente dados en la Tabla 2.1, multiplicando los valores por el factor $(V/200)^{2/3}$, adecuándolos así al volumen de la cámara. Al observar los resultados obtenidos (véase la Tabla 2.3), llama la atención como la norma permite valores mayores del área máxima de absorción sonora equivalente en alta frecuencia, y sin embargo, los valores calculados del área de absorción sonora equivalente se comportan de forma inversa, disminuyendo a medida que aumenta la frecuencia. Esto es debido a que la norma UNE-EN ISO 354:2004, determina que el área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía debe calcularse según la ecuación 5, en la que se tiene en cuenta el efecto de atenuación que produce en el interior de la cámara las condiciones climáticas, mediante el término $4mV$ de la ecuación. La atenuación producida por las condiciones climáticas aumenta con la frecuencia, llegando a tomar valores elevados a partir del tercio de octava de 3150 Hz, lo que hace disminuir el valor del área de absorción sonora equivalente calculado a medida que aumenta la frecuencia.

Frecuencia [Hz]	A_{1_Norma} [m ²]	$A_{1_Calculado}$ [m ²]	¿Cumple?
100	6,6	7,1	No
125	6,6	6,7	No
160	6,6	6,1	Sí
200	6,6	5,7	Sí
250	6,6	5,3	Sí
315	6,6	5,2	Sí
400	6,6	5,3	Sí
500	6,6	5,4	Sí
630	6,6	5,1	Sí
800	6,6	4,7	Sí
1000	7,1	4,6	Sí
1250	7,6	4,5	Sí
1600	8,2	4,4	Sí
2000	9,7	4,1	Sí
2500	10,7	4,0	Sí
3150	12,2	4,0	Sí
4000	13,3	5,3	Sí
5000	14,3	3,3	Sí

Tabla 2.3 Áreas de absorción sonora equivalente de la cámara vacía calculadas con el término $4mV$ y valores máximos permitidos para cámaras de $V = 206 \text{ m}^3$.

La explicación al por qué los valores máximos permitidos por la norma UNE-EN ISO 354:2004 del área máxima de absorción sonora equivalente, aumentan en vez de disminuir a medida que aumenta la frecuencia, se encuentra en la versión anterior de la norma, la ya anulada UNE-EN 20354:1994. En dicha norma no se tenía en cuenta el efecto de la atenuación producido en el interior de la cámara por las condiciones climáticas, en otras palabras, no introducía en la ecuación de Sabine el término $4mV$, por lo que el área de absorción sonora equivalente calculado sí que aumentaba con la frecuencia. A la hora, de elaborar la nueva norma, la UNE-EN ISO 354:2004, no se actualizaron unos nuevos valores para el área máxima de absorción sonora equivalente, aunque sí se modificó la ecuación para el cálculo del área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía A_1 , lo que da lugar a que cámaras que en realidad son muy absorbentes en alta frecuencia, cumplan los requisitos en cuanto a absorción sonora, cuando no debería ser el caso.

En este caso, se comprobó que la cámara de la escuela, efectivamente no cumple los requisitos en las bandas de 4000 Hz y de 5000 Hz si se realizan los cálculos con la norma antigua (Tabla 2.4), pero en cambio, sí los cumple para la norma actual (Tabla 2.3). En cualquier caso, la cámara tampoco cumple los requisitos en las bandas de 100 Hz y 125 Hz.

Frecuencia [Hz]	A_{1_Norma} [m ²]	$A_{1_Calculado}$ [m ²]	¿Cumple?
100	6,6	7,2	No
125	6,6	6,8	No
160	6,6	6,2	Sí
200	6,6	5,9	Sí
250	6,6	5,6	Sí
315	6,6	5,6	Sí
400	6,6	5,7	Sí
500	6,6	5,9	Sí
630	6,6	5,7	Sí
800	6,6	5,5	Sí
1000	7,1	5,6	Sí
1250	7,6	5,8	Sí
1600	8,2	6,3	Sí
2000	9,7	6,9	Sí
2500	10,7	8,1	Sí
3150	12,2	10,3	Sí
4000	13,3	15,0	No
5000	14,3	17,9	No

Tabla 2.4 Áreas de absorción sonora equivalente de la cámara vacía calculadas sin el término $4mV$ y valores máximos permitidos para cámaras de $V = 206 \text{ m}^3$.

A la vista de los resultados, a efectos de comprobación de la absorción de la cámara, lo correcto sería realizar el cálculo del área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía siguiendo la norma antigua UNE-EN ISO 20354; es decir, sin tener en cuenta las condiciones ambientales en el interior de la cámara.

La representación gráfica del área de absorción sonora equivalente de la cámara en función de la frecuencia, Figura 2.4, muestra una curva lisa con tendencia ascendente. Además, no presenta baches ni picos que difieran más del 15 % de la media de los valores de los dos tercios de octava contiguos, como se puede ver en la Tabla 2.5.

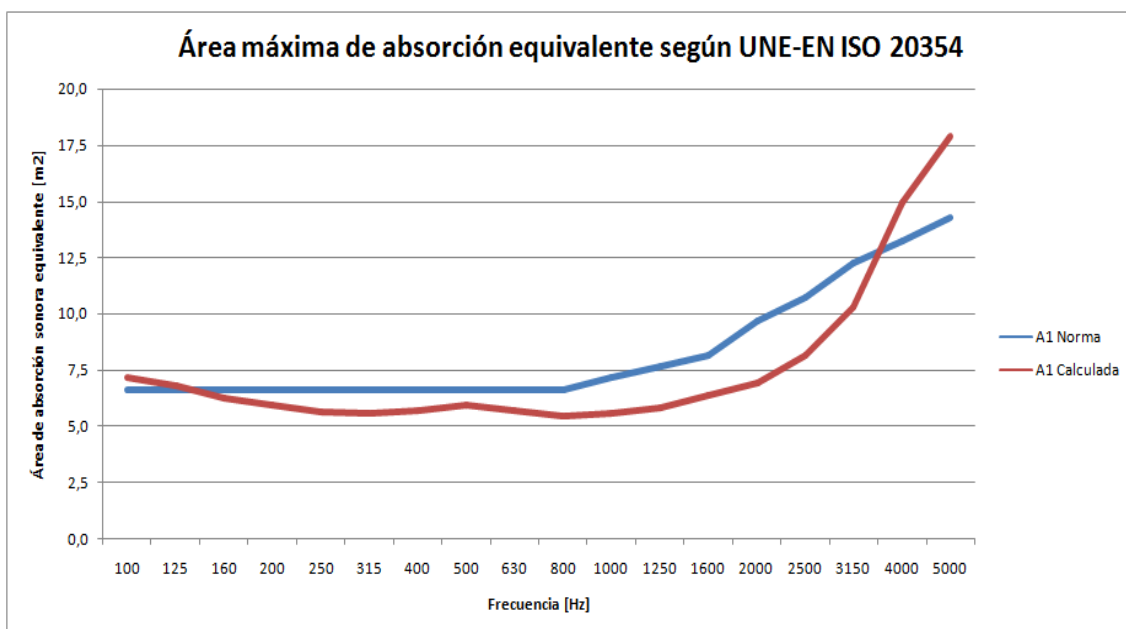


Figura 2.4 Área de absorción sonora equivalente de la cámara en función de la frecuencia.

Frecuencia [Hz]	A_1 [m^2]	< 0,15	¿Cumple?
100	7,2	-	
125	6,8	0,01	Sí
160	6,2	0,02	Sí
200	5,9	0,00	Sí
250	5,6	0,03	Sí
315	5,6	0,02	Sí
400	5,7	0,01	Sí
500	5,9	0,04	Sí
630	5,7	0,00	Sí
800	5,5	0,03	Sí
1000	5,6	0,02	Sí
1250	5,8	0,02	Sí
1600	6,3	0,01	Sí
2000	6,9	0,04	Sí
2500	8,1	0,06	Sí
3150	10,3	0,12	Sí
4000	15,0	0,06	Sí
5000	17,9	-	

Tabla 2.5 Máximas diferencias permitidas entre tercios contiguos del área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía.

2.4.3.2. Muestra de ensayo.

El material utilizado para la realización de la muestra de ensayo, lana de roca, fue suministrado en dos paquetes, conteniendo cada uno, diez planchas de 120x60x5 *cm*.

Según la norma, la muestra de ensayo debe tener un área entre 10 m^2 y 12 m^2 , viéndose incrementado el límite superior del área en el factor $(V / 200)^{2/3}$ para cámaras de volumen superior a 200 m^3 . Además debe ser de forma rectangular con una relación anchura/largo entre 0,7 y 1.

La elección del área depende del volumen de la cámara y de la capacidad de absorción de la muestra. Cuanto mayor sea la cámara, mayor debe ser la superficie de la muestra. Para muestras con bajos coeficientes de absorción, se debe elegir el área de superficie límite superior. En este caso, se eligió el límite inferior, 10 m^2 , porque el material era muy absorbente.

Para lograr el área y la relación ancho/largo requeridos, se usaron doce planchas de lana de roca de 120x60x5 cm, y otras tres que fue necesario cortar, pasando a tener un ancho de 40 cm en vez de 60 cm. Con las quince planchas se formó un rectángulo de 2,80x3,60 m; es decir, de 10,08 m² y una relación ancho/largo de 0,78 (Figura 2.5).



Figura 2.5 Muestra de ensayo colocada en la cámara.

2.4.3.3. Temperatura y humedad relativa.

Se registraron los valores medidos de temperatura y humedad relativa, antes y después de realizar las medidas del tiempo de reverberación, con la cámara vacía y con la cámara conteniendo la muestra de ensayo, para verificar que la temperatura fuese de por lo menos 15 °C y la humedad relativa no fuese inferior al 30 %, ni mayor del 90 %, tal y como determina la norma.

2.4.4. Procedimiento de ensayo.

2.4.4.1. Montaje y colocación de la muestra de ensayo.

La muestra de ensayo debería haberse colocado separada de las aristas de la cámara al menos 0,75 m, evitando que los bordes de la muestra fuesen paralelos a la arista más próxima; pero la división de la cámara imposibilitó dichas especificaciones. Para separar la muestra lo máximo posible del perímetro de la sala, se tuvo que situar pegada a la superficie separadora de la cámara (véase Figura 2.6).

La instalación de la muestra debe realizarse de acuerdo con alguno de los montajes especificados en el anexo B de la norma, a menos que el fabricante requiera especificaciones particulares o que los detalles de aplicación por parte del usuario exijan un montaje diferente. En este proyecto se usó el montaje “*Tipo A*”, por lo que se colocaron los quince paneles del material que forman la muestra directamente sobre el

suelo de la cámara, cubriendo el perímetro de la muestra con un marco acústicamente reflectante hecho con listones de madera de 5x5 *mm* , con el fin de evitar que los bordes absorbiesen sonido. El marco se colocó de forma que no dejase ningún espacio de aire entre la muestra y el marco, y entre la superficie de la cámara y el marco.



Figura 2.6 Montaje y colocación de la muestra de ensayo.

Tras la colocación de la muestra de ensayo en la cámara reverberante, se esperó unos minutos antes de realizar los ensayos para permitir que alcanzase el equilibrio con la temperatura y la humedad relativa del interior de la cámara.

2.4.4.2. Medición del tiempo de reverberación.

Para cada ensayo se realizaron dos grupos de medidas del tiempo de reverberación, uno con la cámara vacía, y otro, tras introducir la muestra en el interior de la cámara. Antes y después de cada grupo de medidas se registraron la temperatura y la humedad relativa en el interior de la cámara, para poder aplicar posteriormente las correcciones debidas al cambio de absorción en el aire. Cada grupo consta de doce medidas independientes del tiempo de reverberación en diferentes posiciones de micrófono y fuente. Se emplearon seis posiciones de micrófono por cada una de las dos posiciones de fuente sonora, manteniendo las distancias exigidas por la norma. Las posiciones de los micrófonos se eligieron de manera que estuviesen separadas al menos 1,5 *m* entre ellas, 2 *m* de la fuente y 1 *m* de las superficies de la cámara y de la muestra de ensayo, y la fuente sonora se situó en dos posiciones separadas al menos 3 *m* entre ellas.

Como ya se ha mencionado, para medir el tiempo de reverberación de la cámara se empleó como señal de excitación una señal MLS. Las señales MLS son básicamente una secuencia binaria de pulsos con patrón pseudoaleatorio, que se repiten en un periodo $L = 2^n - 1$, donde n es un número entero. Se trata de una señal determinista, que por tener duración finita, es fácilmente repetible, haciéndola así periódica. El uso de este tipo de señales evita tener que promediar los tiempos de varias medidas en la misma posición de altavoz-micrófono, puesto que debido a su naturaleza determinista, las desviaciones estadísticas entre medidas en el mismo punto son muy bajas, mejorándose la repetibilidad del método sin necesidad de medir tantas veces. En la Tabla 2.6, se muestra un ejemplo de tres medidas del tiempo de reverberación realizadas empleando una señal MLS en la misma posición de fuente-micrófono y la desviación obtenida entre ellas.

Frecuencia [Hz]	TR1 [s]	TR2 [s]	TR3 [s]	Desviación [s]
100	4,26	4,27	4,26	0,01
125	3,87	3,87	3,87	0,00
160	3,10	3,10	3,10	0,00
200	2,76	2,74	2,75	0,01
250	2,85	2,86	2,86	0,01
315	2,51	2,51	2,51	0,00
400	2,40	2,40	2,40	0,00
500	2,54	2,54	2,54	0,00
630	2,20	2,20	2,20	0,00
800	2,64	2,63	2,64	0,01
1000	2,42	2,40	2,40	0,01
1250	2,51	2,52	2,52	0,01
1600	2,63	2,62	2,62	0,01
2000	2,35	2,32	2,33	0,02
2500	2,30	2,30	2,30	0,00
3150	2,07	2,05	2,05	0,01
4000	1,72	1,71	1,72	0,01
5000	1,32	1,33	1,33	0,01

Tabla 2.6 Repetibilidad de las medidas del tiempo de reverberación usando como señal de excitación MLS.

Las medidas del tiempo de reverberación se realizaron mediante el software dBbati32 de Symphonie, configurando los parámetros de la señal de excitación y del cálculo del tiempo de reverberación.

Para el cálculo del tiempo de reverberación se escogió un rango de evaluación de 20 dB, comenzando 5 dB por debajo del nivel de energía en estado estacionario.

La señal MLS se generó para las bandas de tercio de octava de 100 Hz a 5000 Hz , con una secuencia de 10,2 segundos de duración y 4 repeticiones, lo que hace que la duración total de la medida fuese de 41 segundos.

Para asimilar con exactitud la curva real de caída a una línea recta imaginaria de la misma pendiente, se debe elegir adecuadamente la constante de integración del detector de nivel de presión sonora. Puesto que el Symphonie realiza un promediado lineal, la constante de tiempo, T_{det} , debía ser inferior a $T/12$, siendo T el tiempo de reverberación de la cámara en cada banda de frecuencia. Para determinar la constante de tiempo, se realizó una medida de prueba para conocer el tiempo de reverberación de la cámara vacía en todo el rango de frecuencia, y se escogió el de la banda cuyo tiempo fuese el de menor valor, puesto que si se cumple el criterio para el valor más bajo, se cumplirá para todo el espectro. En este caso, se obtuvo el menor tiempo de reverberación en la banda de 5000 Hz , 1,9 segundos, debiendo escoger un T_{det} menor de 158 ms . Se escogió una constante de tiempo de 80 ms y se verificó, mediante una nueva medida ya con los parámetros ajustados, que el grado de correlación entre la recta asimilada y la caída real en cada banda no fuese inferior a 0,90, Figura 2.7.

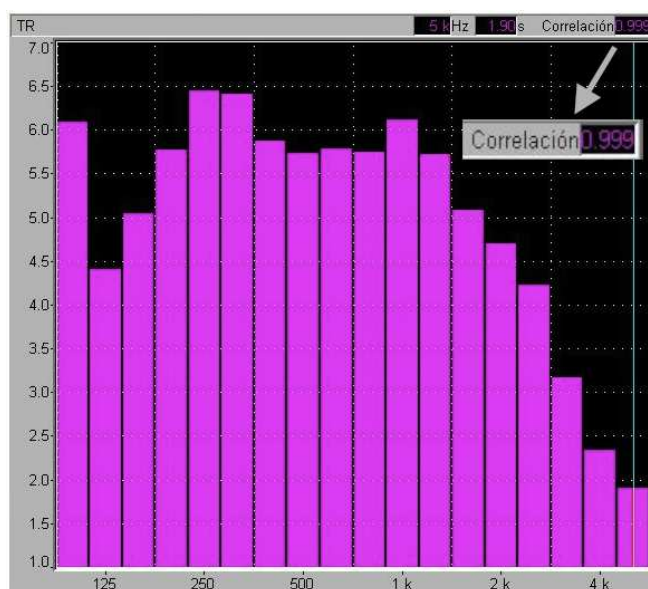


Figura 2.7 Proceso de verificación de la constante de tiempo empleada.

La medición del tiempo de reverberación de la cámara vacía se realizó dejando en su interior el marco de madera que cubría el perímetro de la muestra. La razón es que el montaje de los listones era fijo, y sólo se podía sacar de la sala desmontándolo cada vez que se hacía un nuevo ensayo. Por tanto, una vez finalizados los cinco ensayos, se realizó un nuevo grupo de doce medidas con la cámara sin el marco, para confirmar que su presencia no influyó en los datos obtenidos.

En la Tabla 2.7 se muestran los valores promedios de los doce tiempos de reverberación medidos dejando el marco de madera en el interior, TR_{Marco} , y el valor promedio de las doce medidas una vez retirado, $TR_{SinMarco}$.

Frecuencia [Hz]	TR_{Marco} [s]	$TR_{SinMarco}$ [s]
100	4,63	4,69
125	4,88	5,08
160	5,30	5,46
200	5,58	5,42
250	5,91	6,00
315	5,96	5,78
400	5,82	5,90
500	5,59	5,65
630	5,80	5,67
800	6,05	6,08
1000	5,95	5,92
1250	5,67	5,68
1600	5,22	5,37
2000	4,77	4,83
2500	4,07	4,20
3150	3,22	3,38
4000	2,22	2,37
5000	1,85	1,92

Tabla 2.7 Tiempos de reverberación de la cámara medidos con y sin el marco en su interior.

2.4.5. Resultados obtenidos.

A partir de los tiempos de reverberación medidos, tanto con la cámara vacía, como con la muestra en su interior, y de las condiciones ambientales registradas durante los ensayos, se determinó el coeficiente de absorción acústica de la muestra mediante la implementación de las fórmulas descritas en el apartado 2.3.4. “Determinación del coeficiente de absorción acústica”, en el editor de hojas de cálculo Excel.

En la Tabla 2.8 se muestran los valores del coeficiente de absorción acústica obtenidos en cada uno de los cinco ensayos.

Frecuencia [Hz]	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5
100	0,04	0,00	0,06	0,12	0,00
125	0,15	0,13	0,15	0,17	0,14
160	0,36	0,27	0,36	0,31	0,25
200	0,41	0,43	0,46	0,45	0,41
250	0,60	0,68	0,71	0,57	0,60
315	0,72	0,75	0,84	0,69	0,80
400	0,80	0,84	0,90	0,85	0,86
500	0,78	0,90	0,96	0,85	1,03
630	0,81	0,94	0,99	0,86	0,97
800	0,77	0,94	0,87	0,81	0,90
1000	0,77	0,94	0,88	0,81	0,91
1250	0,71	0,87	0,88	0,76	0,89
1600	0,69	0,89	0,85	0,74	0,87
2000	0,66	0,92	0,91	0,78	0,89
2500	0,65	0,92	0,92	0,84	0,95
3150	0,58	0,83	0,87	0,81	0,88
4000	0,46	0,61	0,62	0,57	0,59
5000	0,60	0,59	0,58	0,49	0,57

Tabla 2.8 Valores del coeficiente de absorción acústica obtenido en cada ensayo.

Para conocer el grado de calidad de los resultados del coeficiente de absorción sonora obtenidos en la cámara de la escuela, se compararon los valores promedios del coeficiente de absorción sonora obtenidos y su desviación típica de repetibilidad, con los resultados de la intercomparación AQUUS-ABSORPTION_1 [4] , realizada en el 2012 y en la cual participaron 14 laboratorios europeos (Tabla 2.9).

Frecuencia [Hz]	Valores de la Escuela		Valores de la intercomparación	
	Coeficiente de absorción sonora (α)	Desviación típica de repetibilidad (S_r)	Coeficiente de absorción sonora (α)	Desviación típica de repetibilidad (S_r)
100	0,04	0,048	0,10	0,012
125	0,15	0,016	0,19	0,014
160	0,31	0,047	0,33	0,016
200	0,43	0,023	0,52	0,019
250	0,63	0,059	0,76	0,025
315	0,76	0,059	0,89	0,033
400	0,85	0,036	0,99	0,018
500	0,90	0,094	1,06	0,023
630	0,91	0,077	1,09	0,028
800	0,86	0,068	1,07	0,023
1000	0,86	0,067	1,07	0,014
1250	0,82	0,084	1,03	0,024
1600	0,81	0,083	1,02	0,022
2000	0,83	0,110	1,01	0,018
2500	0,85	0,123	1,00	0,016
3150	0,79	0,124	0,99	0,016
4000	0,57	0,063	1,00	0,026
5000	0,56	0,046	0,99	0,035

Tabla 2.9 Coeficiente de absorción sonora y repetibilidad correspondientes a los ensayos realizados y a la intercomparación AQUUS-ABSORPTION_1.

Como se puede ver en la Figura 2.8, los valores resultantes de la intercomparación son mayores a los obtenidos en la cámara de la escuela en todo el rango de frecuencias evaluado, sobre todo en alta frecuencia, donde el coeficiente de absorción acústico de la intercomparación es casi el doble que el obtenido en la cámara de la escuela. Lo que posiblemente se puede atribuir al exceso de absorción de la cámara en esas bandas de frecuencia (4000 Hz y 5000 Hz).

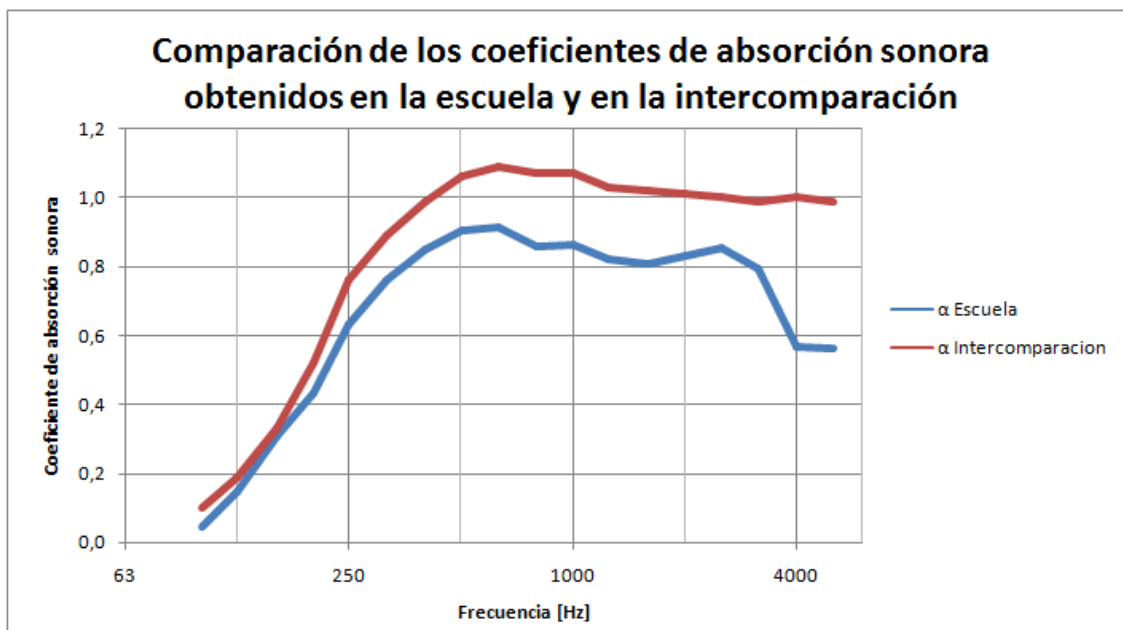


Figura 2.8 Comparación de los coeficientes de absorción acústica obtenidos en la cámara de la escuela y en la intercomparación AQU-ABSORPTION_1.

Además, también se puede observar en la Figura 2.9, como la desviación típica de repetibilidad es notablemente menor entre los resultados de los 14 laboratorios que participaron en la intercomparación, en comparación con la hallada entre los cinco ensayos realizados en la cámara de la escuela.

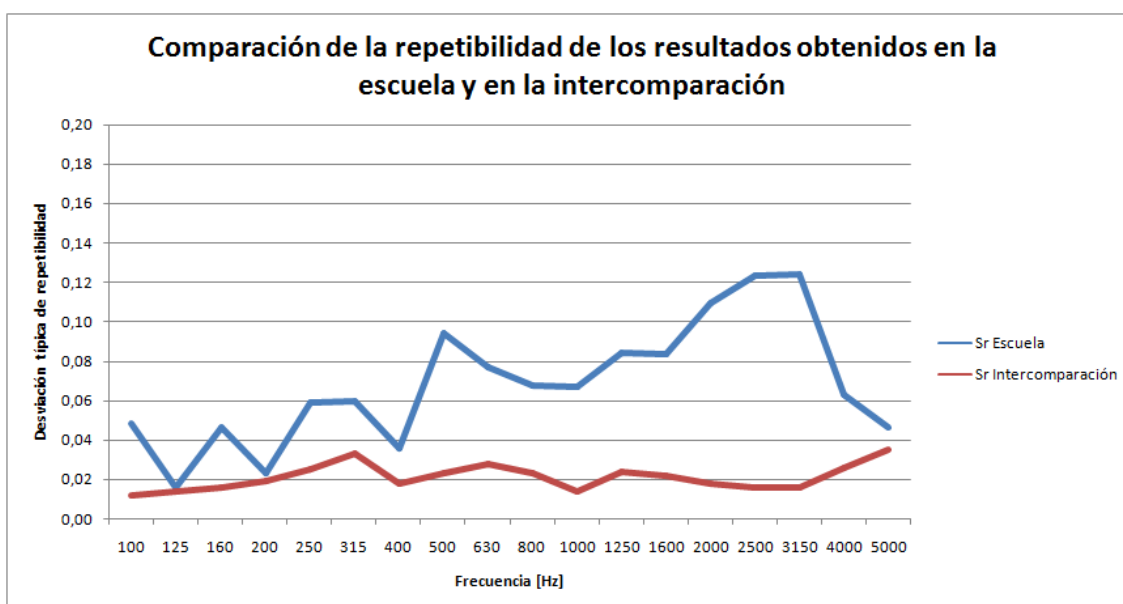


Figura 2.9 Comparación de la repetibilidad de los resultados obtenidos en la cámara de la escuela y en la intercomparación AQU-ABSORPTION_1.

Tal y como se observa en la Tabla 2.4, la cámara de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM es más absorbente en las bandas de 4000 Hz y 5000 Hz de lo que la norma UNE-EN ISO 354 exige. La consecuencia de esta desviación con respecto a la norma, se observa en la Figura 2.8, donde el coeficiente de absorción sonora del material obtenido es muy inferior del valor asignado al mismo material en la intercomparación AQUUS-ABSORPTION_1. En cuanto a la repetibilidad de los resultados obtenidos en la cámara de la Escuela (Figura 2.9), puesto que la desviación entre medidas del tiempo de reverberación en el mismo punto es mínima (Tabla 2.6), se puede asumir que la baja repetibilidad entre los coeficientes de absorción sonora resultantes de los cinco ensayos, es debida a una falta de difusión en el campo acústico de la cámara, lo que provoca que la desviación entre las medidas del tiempo de reverberación entre los diferentes puntos sea alta.

Por tanto, se puede concluir que la cámara de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM no es adecuada para la aplicación de la norma UNE-EN ISO 354 en la realización de ensayos de medida de la absorción acústica.

3

Evaluación de la incertidumbre en la medida del coeficiente de absorción acústica

3.1. Concepto de incertidumbre.

A la hora de expresar el resultado de una medición de una magnitud física, es obligado dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado para poder evaluar su idoneidad. Sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con otros valores de referencia dados en especificaciones o normas. Por este motivo fue necesario el desarrollo del documento GUM, *Guide for the Expression of Uncertainty in Measurement*, para establecer un procedimiento fácilmente comprensible y aceptado universalmente para caracterizar la calidad del resultado de una medición; es decir, para evaluar y expresar su *incertidumbre*.

La GUM define la *incertidumbre de medida* como un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando (magnitud particular sometida a medición). Refleja la imposibilidad de conocer exactamente el valor del mensurando.

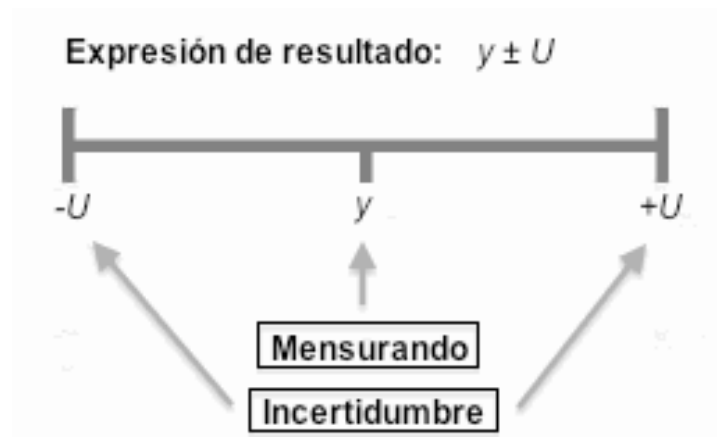


Figura 3.1 Expresión del resultado de una medición. Mensurando con su incertidumbre asociada.

Sin la incertidumbre de medida asociada al valor atribuido al mensurando, la expresión del resultado de una medición estaría incompleta. Por ello en el presente capítulo se describe el proceso de cálculo de la incertidumbre asociada a los resultados de las mediciones del coeficiente de absorción acústica realizadas.

3.2. Métodos de cálculo de la incertidumbre.

En la *Guía para la expresión de la incertidumbre de medida*, la GUM, se establecen las reglas para evaluar y expresar la incertidumbre de medida mediante distintos métodos:

- El enfoque clásico de la GUM, basado en la ley de propagación de la incertidumbre, por medio de la identificación y cuantificación de fuentes individuales de la incertidumbre.
- El método de Monte Carlo, basado en la propagación de distribuciones de probabilidad a partir de un modelo matemático.

La aplicación del enfoque clásico de la GUM, basado en la ley de propagación de incertidumbres, no siempre proporciona resultados válidos. Esto se debe a que la propagación de incertidumbre se basa en la sustitución del modelo por una aproximación basada en el desarrollo en serie de Taylor de primer orden (si el modelo es lineal) o mayor orden (si el modelo es no lineal). Cuando el modelo es lineal, el método no presenta problemas, pero si en el modelo hay presentes componentes no lineales, deben incluirse los términos de orden superior. En ciertas ocasiones, añadir los términos de orden superior resulta una tarea complicada o incluso imposible (por ejemplo, si no se pueden realizar las derivadas parciales del modelo hasta el orden requerido) lo que hace que la aplicación de este método no sea adecuada. Si hubiese evidencias de que el enfoque clásico de la GUM puede no fuera válido, debe emplearse otro procedimiento de cálculo de la incertidumbre de medida.

El método de Monte Carlo, descrito en el *Suplemento 1 de la GUM. Propagación de distribuciones aplicando el método Monte Carlo*, es un método alternativo para realizar el cálculo de la incertidumbre de medida, en situaciones en que las condiciones para el enfoque clásico de la GUM, no se cumplen o su cumplimiento es poco evidente. Es de aplicación cuando:

- la linealización del modelo proporciona una representación inadecuada, o cuando,
- la función de densidad de probabilidad (FDP) para la magnitud de salida se aparta apreciablemente de una distribución normal o de una distribución *t-student*, por ejemplo, debido a una marcada asimetría.

Este método también puede utilizarse cuando la aplicación del enfoque clásico de la GUM resulte difícil, por ejemplo, debido a la dificultad de relacionar la incertidumbre de la magnitud de salida con las incertidumbres de las magnitudes de entrada dada la complejidad del modelo.

El suplemento también proporciona un procedimiento de validación para comprobar que puede aplicarse el enfoque clásico de la GUM sobre la incertidumbre, el cual se utilizó para validar los resultados obtenidos en este trabajo.

Ante circunstancias en que pueda demostrarse la aplicabilidad del enfoque clásico de la GUM, éste debe ser la principal opción para evaluar la incertidumbre.

Los principios básicos en los que se fundamentan los diferentes métodos son los mismos.

3.2.1. Fases principales de la evaluación de la incertidumbre.

Las fases principales de la evaluación de la incertidumbre son:

- *Formulación:*
 - 1) Definir la magnitud de salida Y , la magnitud a evaluar (el mensurando).
 - 2) Determinar las magnitudes de entrada $X = (X_1, \dots, X_N)^T$ de las que depende la magnitud de salida Y .
 - 3) Desarrollar un modelo que relacione la magnitud de salida Y con las magnitudes de entrada X .
 - 4) A partir de los conocimientos disponibles, asignar las funciones de densidad de probabilidad (FDP) – gaussiana (normal), rectangular (uniforme), etc. – a cada magnitud de entrada X_i . Asignar una FDP conjunta a aquellas X_i que no sean independientes.
- *Propagación:* propagar las funciones de densidad de probabilidad de las magnitudes de entrada X_i mediante el modelo para obtener la FDP de la magnitud de salida Y .

- *Resumen:* utilizar la FDP de Y para obtener:
 - 1) La esperanza matemática de Y , considerada como la estimación y del mensurando.
 - 2) La desviación típica de Y , considerada como la incertidumbre típica $u(y)$ asociada a y .
 - 3) Un intervalo de cobertura que contenga Y con una probabilidad específica (nivel de confianza).

3.2.2. Fase de propagación de distribuciones.

La realización de la propagación de distribuciones puede llevarse a cabo de diferentes formas:

- 1) Métodos analíticos, es decir, métodos que proporcionan una representación matemática de la función de densidad de probabilidad (FDP) para la magnitud de salida Y .
- 2) Propagación de incertidumbre basada en la sustitución del modelo por una aproximación basada en el desarrollo en serie de Taylor de primer orden (ley de propagación de incertidumbres).
- 3) Como el apartado 2) pero incluyendo las contribuciones de los términos de mayor orden en el desarrollo en serie de Taylor.
- 4) Métodos numéricos que implementan la propagación de distribuciones, particularmente los que utilizan el método de Monte Carlo.

Es en la fase de propagación donde se toma la decisión de seleccionar el método adecuado. Para modelos lineales y magnitudes de entrada con funciones de distribución normales, la aproximación con la ley de propagación de incertidumbre (enfoque clásico de la GUM) produce unos resultados consistentes. Pero en casos donde la ley de propagación de incertidumbre no pueda ser aplicada, el método Monte Carlo puede proporcionar valores adecuados.

En la Figura 3.2 se muestra un ejemplo de cómo la función de densidad de probabilidad g_y de la magnitud de salida Y , proporcionada por la propagación, mediante el modelo, de las FDP g_{x_i} de 3 magnitudes independientes de entrada normales, aparece como asimétrica, que habitualmente sucede en modelos no lineales o asimétricos g_{x_i} . Las FDP de las magnitudes de entrada son gaussiana, triangular y gaussiana, respectivamente. En este caso, la no linealidad del modelo es un indicativo de que el enfoque GUM puede no ser válido, resultando unos intervalos de cobertura poco realistas.

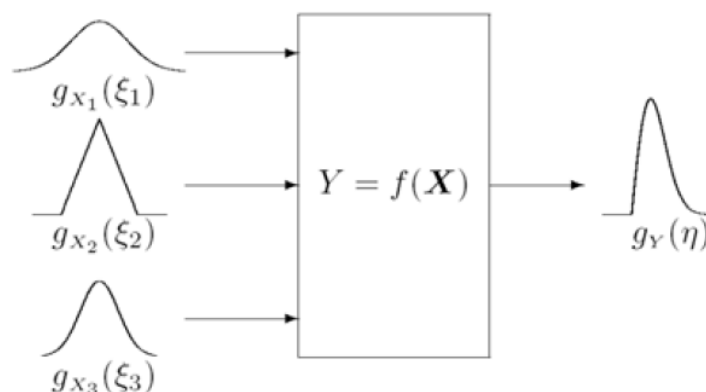


Figura 3.2 Ilustración de la propagación de distribuciones.

Para evaluar y expresar la incertidumbre de medida, este trabajo se centra en dos métodos: el enfoque clásico de la GUM y el método Monte Carlo.

3.2.3. Enfoque clásico de la GUM. Propagación de incertidumbres.

Como ya se ha mencionado, el enfoque clásico de la GUM se basa en la ley de propagación de la incertidumbre y en la caracterización de la magnitud de salida mediante una distribución normal o una distribución t .

Cada magnitud de entrada X_i se representa por su esperanza matemática y su desviación típica, obtenidas de la función de densidad de probabilidad (FDP) de dicha magnitud. La esperanza matemática se considera la mejor estimación x_i de X_i y la desviación típica, la incertidumbre típica $u(x_i)$ asociada a x_i .

El enfoque GUM agrupa a las componentes de incertidumbre en dos tipos, A y B, en función del método para estimar su valor numérico:

- *Tipo A*: son las que se evalúan por métodos estadísticos, a partir del análisis de series de observaciones.
- *Tipo B*: son las que se evalúan por otros métodos no estadísticos.

La evaluación de la incertidumbre típica depende del tipo de incertidumbre.

3.2.3.1. Evaluación de la incertidumbre tipo A.

La mejor estimación disponible de la esperanza matemática μ_q de una magnitud q que varía al azar (variable aleatoria), de la que se han obtenido n observaciones independientes q_k en las mismas condiciones, es la media aritmética \bar{q} de las n observaciones:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (18)$$

La varianza experimental de las observaciones, que estima la varianza σ^2 de la distribución de probabilidad de q , viene dada por:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (19)$$

Esta estimación de la varianza y su raíz cuadrada positiva $s(q_k)$, denominada desviación típica experimental, representan la variabilidad de los valores observados q_k , o más específicamente, su dispersión alrededor de su media.

La mejor estimación de $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2 / n$, varianza de la media, viene dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad (20)$$

La varianza experimental de la media, $s^2(\bar{q})$, y la desviación típica experimental de la media $s(\bar{q})$, igual a su raíz cuadrada positiva, pueden ser utilizadas como medida de la incertidumbre de \bar{q} . Normalmente se utiliza la desviación típica de la media como estimador de la incertidumbre $u(x_i)$.

3.2.3.2. Evaluación de la incertidumbre tipo B.

La varianza estimada asociada $u^2(x_i)$ o la incertidumbre típica $u(x_i)$ se establecen mediante decisión científica basada en toda la información disponible acerca de la variabilidad posible de X_i .

Algunos casos frecuentes son:

- *Cuando se conoce la incertidumbre expandida de esa componente:* se divide el valor de la incertidumbre expandida por el factor de cobertura utilizado para obtenerla.

$$u(x_i) = \frac{U}{k} \quad (21)$$

- *Cuando se pueden estimar los límites de variación ($\pm a$) de una magnitud de entrada:* Se asume una distribución rectangular de probabilidad.

$$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

3.2.3.3. Determinación de la incertidumbre típica combinada.

La incertidumbre típica de y , siendo y la estimación del mensurando Y ; es decir, el resultado de medida, se obtiene aplicando la ley de propagación de incertidumbre mediante un desarrollo en serie de Taylor de primer orden (ecuación 23), en el que se combinan las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Esta incertidumbre típica combinada de la estimación y se nota como $u_c(y)$.

La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es la raíz cuadrada positiva de la varianza combinada $u_c^2(y)$, dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (23)$$

donde f es el modelo de medición. Cada $u(x_i)$ es la incertidumbre típica evaluada en función del tipo de incertidumbre (A o B). Las derivadas parciales $\partial f / \partial x_i$ se denominan coeficientes de sensibilidad. Estos coeficientes describen cómo varía la incertidumbre de salida de la magnitud y , en función de las variaciones de las incertidumbres de las magnitudes de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Por tanto la ecuación 23 se puede escribir de la forma:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (24)$$

donde c_i son los coeficientes de sensibilidad:

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} \quad (25)$$

La incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ es una desviación típica evaluada y caracteriza la dispersión de los valores que podrían ser razonablemente atribuidos al mensurando Y .

3.2.3.4. Determinación de la incertidumbre expandida.

La incertidumbre expandida U se obtiene multiplicando la incertidumbre típica combinada $u_c(y)$ por un factor de cobertura k que garantice un determinado nivel de confianza p . Define un intervalo en torno al resultado de una medición, y en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores que podrían ser atribuidos razonablemente al mensurando.

$$U = k u_c(y) \quad (26)$$

El intervalo de cobertura $y - U_p \leq Y \leq y + U_p$ se establece considerando la FDP de Y como gaussiana (normal), si los grados de libertad asociados a $u(y)$ son infinitos ($\nu_{eff} = \infty$), o como una distribución t o distribución *Student*, si son finitos ($\nu_{eff} < \infty$). Cuando los grados efectivos de libertad son mayores de 30, la forma de la distribución *t-student* se asimila a una distribución normal, y por tanto, puede tomarse un valor de k igual a 2 para un nivel de confianza del 95 %.

En muchas ocasiones, puede atribuirse una distribución normal al mensurando; pero cuando se trata de una distribución t , es necesario el cálculo de los grados de libertad efectivos para la obtención del factor de cobertura k . Dicho cálculo se realiza mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (27)$$

La obtención de los grados de libertad efectivos de la ecuación 27 implica conocer el número de grados de libertad v_i de cada incertidumbre típica. Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo A, v_i es igual a $n - 1$, para una magnitud única estimada a partir de n observaciones independientes. Para una componente obtenida mediante evaluación Tipo B, v_i depende de la fiabilidad que pueda suponerse al valor de dicha componente. En la práctica puede considerarse como conocida con exactitud lo que implica que $v_i = \infty$.

Para distribuciones t , el factor de cobertura k se toma en función del nivel de confianza deseado p y de los grados de libertad efectivos obtenidos v_{eff} . Para distribuciones normales k se toma solamente en función de p .

3.2.4. Método de Monte Carlo. Propagación de distribuciones.

El método de Monte Carlo proporciona una aproximación general para obtener una representación numérica aproximada G de la función de distribución de la magnitud de salida Y . Se basa en muestrear repetidamente a partir de las funciones de densidad de probabilidad (FDP) de las magnitudes de entrada X_i y evaluar el modelo en cada caso. La calidad de estos resultados mejora al aumentar el número de veces que se muestrean las FDP; es decir, al aumentar el número de reiteraciones del proceso M .

Este método puede establecerse como un procedimiento paso a paso:

- 1) Seleccionar el número M de reiteraciones de Monte Carlo a realizar.
- 2) Generar M vectores correspondientes a las N magnitudes de entrada X_i , mediante muestreo de las FDP asignadas a cada una de las N magnitudes de entrada X_i .
- 3) Deducir el correspondiente valor de Y del modelo para cada uno de dichos vectores obteniendo los M valores del modelo.
- 4) Ordenar los M valores del modelo en orden estrictamente creciente para obtener la representación discreta de la función de distribución de la magnitud de salida denominada G .
- 5) Utilizar G para deducir una estimación y de la magnitud de salida Y y la incertidumbre típica $u_c(y)$ asociada a y .
- 6) Utilizar G para deducir un intervalo de cobertura adecuado para Y , para una probabilidad especificada p .

La probabilidad de cobertura se define como la probabilidad de que el valor de una magnitud esté contenido dentro de un intervalo de cobertura especificado. A veces se denomina *nivel de confianza*, el cual se expresa frecuentemente en porcentaje de la forma $100p$ %.

3.2.4.1. Número M de reiteraciones.

La elección del número M de reiteraciones a realizar con el método Monte Carlo, número de veces que se evalúa el modelo, puede elegirse a priori, en cuyo caso no habrá un control directo de la calidad de los resultados numéricos proporcionados. Esto se debe a que el número de reiteraciones necesarias para obtener unos resultados dentro de una tolerancia numérica, previamente establecida, depende de la “forma” de la FDP para la magnitud de salida y de la probabilidad de cobertura p requerida. Sin embargo, un valor de $M = 10^6$ suele proporcionar un intervalo de cobertura del 95 % ($p = 0,95$) para la magnitud de salida con una amplitud del intervalo correcta para una o dos cifras decimales significativas.

Al menos, debe elegirse un valor de M grande comparado con $1/(1-p)$, como por ejemplo, tomar M al menos 10^4 veces mayor que $1/(1-p)$. De este modo, se puede esperar que la representación numérica G de la magnitud de salida proporcione una representación discreta y razonable de la función de distribución Y en las regiones cercanas a los límites de un intervalo de cobertura del $100p$ % de Y .

De cualquier manera, no hay garantía de que el número asignado previamente sea suficiente, pero existe un procedimiento, denominado método de Monte Carlo adaptable, que selecciona M de forma automática a medida que las reiteraciones se van sucediendo. Este procedimiento se explica en el apartado 3.2.6. “Validación del enfoque GUM mediante el método de Monte Carlo. Monte Carlo adaptable”.

3.2.4.2. Muestreo a partir de distribuciones de probabilidad.

El método Monte Carlo obtiene sus M muestras x_i mediante las FDP asignadas a las magnitudes de entrada X_i , a partir de sus mejores estimaciones (esperanzas matemáticas) y de sus incertidumbres típicas asociadas (desviaciones típicas).

3.2.4.3. Evaluación del modelo.

Los M valores de salida y_r se obtienen evaluando el modelo para cada una de las M muestras x_i obtenidas a partir de las FDP de las N magnitudes de entrada X_i .

$$y_r = f(x_r) \quad (28)$$

siendo $r = 1, \dots, M$.

3.2.4.4. Representación discreta de la función de distribución para la magnitud de salida.

La representación discreta G de la función de distribución para la magnitud de salida Y se obtiene ordenando los M valores y_r del modelo en orden estrictamente creciente.

Si se representa y_r en forma de histograma, formando una distribución de frecuencias y normalizándolas para tener un área unitaria, se proporciona una

aproximación a la función de densidad de probabilidad de la magnitud Y que representa. El histograma puede ser útil para entender la naturaleza de la FDP, como por ejemplo el grado de su asimetría.

3.2.4.5. Estimación de la magnitud de salida y de su incertidumbre típica asociada.

De la función de distribución G se obtienen la media aritmética y la desviación típica de los M valores y_r , que se toman, respectivamente, como la estimación y de Y , y su incertidumbre típica $u(y)$ asociada a y .

3.2.4.6. Intervalo de cobertura para una magnitud de salida.

El *Suplemento de la GUM* define el término intervalo de cobertura como el intervalo que contiene el valor de una magnitud, con una probabilidad declarada p , basada en la información disponible. En general, existe más de un intervalo de cobertura para una probabilidad establecida, por lo que el *Suplemento* define el intervalo de cobertura tanto para funciones de densidad de probabilidad simétricas, denominándolo intervalo de cobertura con probabilidad simétrica, como para FDP asimétricas, denominándolo menor intervalo de cobertura.

Un intervalo de cobertura para Y puede determinarse a partir de la representación discreta G de la función de distribución de la siguiente manera:

Sea $q = pM$, si pM es un entero, o q la parte entera de $pM + 1/2$, si no lo es, entonces $[y_{\inf}, y_{\sup}]$ es un intervalo de cobertura del $100p$ % para Y

donde, para cualquier $r = 1, \dots, M - q$, $y_{\inf} = y_r$ y $y_{\sup} = y_{r+q}$.

Para FDP simétricas, el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica del $100p$ % se calcula tomando $r = (M - q)/2$, si $(M - q)/2$ es un entero, o la parte entera de $(M - q + 1)/2$ en caso contrario. Mientras que para FDP asimétricas, el menor intervalo de cobertura del $100p$ % se obtiene tomando un r^* tal que, para $r = 1, \dots, M - q$, $y_{(r^*+q)} - y_{r^*} \leq y_{(r+q)} - y_r$. Esto significa que, primero se obtienen todos los intervalos que garanticen un intervalo de cobertura del $100p$ %, y después, se escoge de entre todos los intervalos el de menor amplitud, es decir, el que tenga una menor diferencia entre los valores máximo y mínimo del intervalo de cobertura.

El menor intervalo de cobertura se encuentra siempre en la zona de mayor densidad de probabilidad, y tal y como se espera de una FDP simétrica, el intervalo adquiere la menor amplitud cuando se sitúa simétricamente con respecto a la estimación de Y (esperanza matemática), siendo el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica del $100p$ % y el menor intervalo de cobertura del $100p$ % idénticos para FDP simétricas, como es el caso de la distribución gaussiana y la distribución t utilizadas en el enfoque clásico de la GUM. Sin embargo, cuando la FDP de Y no es simétrica, el intervalo de cobertura no queda centrado en la estimación de Y , por este motivo, la elección del menor intervalo de cobertura es más apropiado que el intervalo de cobertura con probabilidad simétrica cuando la FDP de la magnitud de salida es asimétrica.

3.2.5. Comparación entre el enfoque GUM y el método de Monte Carlo.

Las desviaciones del método de Monte Carlo con respecto al enfoque clásico de la GUM son:

- Las FDP están explícitamente asignadas a todas las magnitudes de entrada X_i basándose en la información relativa a dichas magnitudes. No se necesita la clasificación en evaluaciones de incertidumbre Tipo A y Tipo B.
- No se necesitan las derivadas parciales de primer orden u orden superior, utilizadas para proporcionar los coeficientes de sensibilidad en la ley de propagación de incertidumbre, lo que se traduce en un menor esfuerzo de análisis.
- Se obtiene una representación numérica de la función de distribución de Y definida completamente a partir del modelo y de las FDP de X_i , y no limitadas a una distribución gaussiana o a una distribución t .
- Dado que la FDP de Y no es en general simétrica, un intervalo de cobertura de Y no queda necesariamente centrado en la estimación de Y .
- No es necesario un factor de cobertura cuando se determina un intervalo de cobertura.

- En modelos no lineales proporciona una mejor estimación de Y y una mejor incertidumbre típica asociada a la estimación de Y , especialmente cuando las X_i tienen asignadas FDP no gaussianas, por ejemplo asimétricas.

3.2.6. Validación del enfoque GUM mediante el método de Monte Carlo. Monte Carlo adaptable.

No siempre es sencillo poder determinar si se cumplen todas las condiciones necesarias para la aplicación del enfoque clásico proporcionado por la GUM, por lo que deberá procederse a una validación en caso de duda. Dado que el campo de validez del método de Monte Carlo es mayor que el del enfoque GUM, se recomienda la aplicación de ambos métodos y la comparación de los resultados obtenidos. Si la comparación resulta favorable, podrá utilizarse el enfoque GUM, en caso contrario, deberá darse prioridad al empleo del método Monte Carlo.

Para realizar la validación, se tiene que, en primer lugar, aplicar el enfoque GUM con objeto de encontrar un intervalo de cobertura $y \pm U_p$ para un nivel de confianza del $100p$ % para la magnitud de salida. Después, aplicar el método de Monte Carlo adaptable que proporcione la incertidumbre típica $u(y)$ y los límites y_{\inf} e y_{\sup} del intervalo del $100p$ % (simétrico o mínimo) requerido para la magnitud de salida. Y por último, realizar el procedimiento de comparación, que tiene como objetivo determinar si los intervalos de cobertura obtenidos por ambos métodos coinciden dentro de una tolerancia numérica estipulada. Esta tolerancia se evalúa en términos de los límites de los intervalos de cobertura y corresponde a la obtenida al expresar la incertidumbre típica $u(y)$ mediante un número significativo de dígitos decimales.

3.2.6.1. Método de Monte Carlo adaptable.

El procedimiento de Monte Carlo adaptable supone la realización de un número creciente de reiteraciones de Monte Carlo, hasta que los resultados de interés se hayan estabilizado en sentido estadístico. Un resultado se considera estabilizado cuando el doble de su desviación típica asociada es inferior a la tolerancia numérica asociada a la desviación típica $u(y)$.

La tolerancia δ de un valor numérico z , se obtiene como:

$$\delta = \frac{1}{2} 10^l \quad (29)$$

Tras expresar z en la forma $c \times 10^l$, donde c es un entero con n_{dig} cifras decimales significativas consideradas como imprescindibles para el valor numérico z , y l es un entero.

En realidad, la tolerancia numérica δ es el semiescalón de la resolución de un valor numérico z .

El objetivo del procedimiento adaptable consiste en proporcionar una estimación y de Y , una incertidumbre típica asociada $u(y)$, los límites y_{inf} e y_{sup} de un intervalo de cobertura para Y correspondiente a la probabilidad de cobertura p estipulada, de forma que cada uno de estos cuatro valores alcance la tolerancia numérica requerida.

El procedimiento adaptable a seguir es el siguiente:

- 1) Fijar n_{dig} a un valor adecuado, entero, positivo y pequeño.
- 2) Fijar M como:

$$M = \max(J, 10^4) \quad (30)$$

donde J es el entero más pequeño, mayor o igual que $100/(1-p)$.

- 3) Fijar $h = 1$ por tratarse de la primera iteración del método. El término h indica el número de veces que se realiza la aplicación del método Monte Carlo.
- 4) Efectuar M reiteraciones de Monte Carlo, como se describe en el apartado 3.2.4. *“Método de Monte Carlo. Propagación de distribuciones”*.

- 5) Usar los M valores del modelo y_1, \dots, y_M obtenidos para calcular $y_{(h)}$, $u(y_{(h)})$, $y_{(h)\text{inf}}$ e $y_{(h)\text{sup}}$; es decir, una estimación de Y , su incertidumbre típica asociada y los límites izquierdo y derecho para un nivel de confianza del $100p$ %, para h -ésimo elemento de la secuencia.
- 6) Si $h = 1$, incrementar en una unidad y volver al paso 4). Es decir, si solamente se ha realizado una aplicación del método de Monte Carlo, volver a efectuar M reiteraciones de Monte Carlo.
- 7) Calcular la desviación típica s_y asociada a la media de las estimaciones del valor asignado $y_{(1)}, \dots, y_{(h)}$ de Y .
- 8) Calcular el homólogo de este estadístico para $u(y)$, y_{inf} e y_{sup} .
- 9) Emplear todos los $h \times M$ valores disponibles del modelo para obtener $u(y)$.
- 10) Calcular la tolerancia numérica δ asociada a $u(y)$.
- 11) Si cualquiera de los valores $2s_y$, $2s_{u(y)}$, $2s_{y\text{inf}}$ y $2s_{y\text{sup}}$ supera a δ , incrementar h en una unidad y volver al paso 4).
- 12) Considerar el cálculo total como estabilizado y emplear todos los $h \times M$ valores obtenidos del modelo para calcular y , $u(y)$ y un intervalo de cobertura adecuado para un nivel de confianza del $100p$ %.

Los pasos descritos son los correspondientes a la realización del método de Monte Carlo adaptable, pero a efectos de validación, deben realizarse dos modificaciones. La primera, es que debe elegirse un número M suficiente de reiteraciones como se describe en el apartado 3.2.4.1. “Número M de reiteraciones”. La segunda, es que se recomienda obtener resultados del método dentro de una tolerancia $\delta/5$, reemplazando δ por $\delta/5$ en el paso 11) del procedimiento. Este cambio puede requerir un valor de M unas 25 veces mayor que el requerido para una tolerancia δ .

3.2.6.2. Procedimiento de comparación.

Este procedimiento compara los intervalos de cobertura obtenidos por el método GUM y por el método Monte Carlo, para determinar si se ha obtenido el número requerido de dígitos decimales correctos en el intervalo proporcionado por el método clásico de la GUM. Deben determinarse las diferencias absolutas de los respectivos límites de ambos intervalos:

$$d_{\text{inf}} = |y - U_p - y_{\text{inf}}| \quad (31)$$

$$d_{\text{sup}} = |y + U_p - y_{\text{sup}}| \quad (32)$$

Si tanto d_{inf} como d_{sup} son inferiores a δ , la comparación es favorable y el enfoque clásico de la GUM resulta validado.

3.3. Aplicación del enfoque clásico de la GUM al ensayo.

La evaluación de la incertidumbre asociada al ensayo de la medición de la absorción acústica en cámara reverberante siguiendo el enfoque clásico de la GUM, se realizó de dos formas diferentes. La razón es que la introducción de dos de las magnitudes de entrada al modelo, presentaba una gran complejidad debido a que no se trataba de magnitudes directas, si no que fueron determinadas a partir de otros parámetros medidos. Además, sus bajos valores, en comparación con otras magnitudes de entrada, daban una idea de que sus aportaciones a la incertidumbre resultante podrían ser prácticamente despreciables. Por estos motivos, inicialmente no fueron tenidas en cuenta en el cálculo. Posteriormente, se resolvió este problema aplicando el método de Monte Carlo para estimar las desviaciones típicas asociadas a dichas magnitudes, e introduciendo los valores obtenidos en el proceso de cálculo, para comprobar así, si la premisa de despreciar las magnitudes en la evaluación de la incertidumbre fue acertada o por el contrario, un error.

A continuación se describen los pasos para la evaluación de la incertidumbre siguiendo el enfoque clásico de la GUM, para cada banda de tercio de octava en el rango de 100 Hz a 5000 Hz.

3.3.1. Modelo matemático.

La determinación del coeficiente de absorción sonora α_s de un absorbente según la norma UNE-EN ISO 354:2004 viene dada por la ecuación 17. Introduciendo la ecuación 16 en la ecuación 17, se obtiene el modelo matemático del mensurando como:

$$\alpha_s = \frac{55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V(m_2 - m_1)}{S} \quad (33)$$

3.3.2. Determinación de las fuentes de incertidumbre.

Como se puede ver en la ecuación 33, hay cinco magnitudes de entrada en el modelo:

- T_1 : el tiempo de reverberación medido de la cámara vacía.
- T_2 : el tiempo de reverberación medido de la cámara con la muestra de ensayo.
- V : el volumen de la cámara reverberante.
- m_1 : el coeficiente de atenuación sonora, calculado a partir de las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición con la cámara vacía.
- m_2 : el coeficiente de atenuación sonora, calculado a partir de las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante la medición con la muestra en la cámara.

En la evaluación de la incertidumbre típica de las magnitudes de entrada siguiendo el enfoque clásico de la GUM (clasificación en Tipo A o en Tipo B) solamente se tuvieron en cuenta las magnitudes directas; es decir, las medidas en los ensayos: los dos tiempos de reverberación de la cámara y su volumen.

Como las magnitudes m_1 y m_2 se calcularon a partir del coeficiente de atenuación de la atmósfera α , con una serie de ecuaciones complejas dadas en la Norma Internacional ISO 9613-1, la aplicación de la ley de propagación de incertidumbre conllevaba un alto grado de dificultad. Por tanto, las incertidumbres típicas asociadas a m_1 y a m_2 se calcularon mediante el método Monte Carlo y no mediante evaluación Tipo A y Tipo B, como en el caso de las otras tres.

3.3.2.1. Evaluación Tipo A de la incertidumbre típica.

Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal, por ello la evaluación Tipo A de la incertidumbre típica de las magnitudes de entrada V , T_1 y T_2 para cada banda de frecuencia del rango de estudio, se calculó considerando normales las funciones de densidad de probabilidad, debidas a las n observaciones independientes y caracterizadas por sus desviaciones típicas de la media, que representan la dispersión de las n mediciones.

En la Tabla 3.1 se muestra el método de cálculo de las incertidumbres típicas de cada magnitud de entrada para componentes de incertidumbre tipo A.

Magnitud de entrada X_i	Número de observaciones independientes n	Desviación típica de la media	Función de densidad de probabilidad FDP	Divisor d	Incertidumbre típica $u_A(x_i)$
T_1	12	$s_{X_i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ $s_{X_i}(\bar{x}) = \frac{s_{X_i}}{\sqrt{n}}$	Normal	1	$u_A(X_i) = \frac{s_{X_i}(\bar{x})}{d}$
T_2	12		Normal	1	
V	9		Normal	1	

Tabla 3.1 Incertidumbres típicas Tipo A de las magnitudes de entrada.

3.3.2.2. Evaluación Tipo B de la incertidumbre típica.

La única componente de incertidumbre de Tipo B tenida en cuenta en las magnitudes de entrada T_1 y T_2 fue la resolución de escala del instrumento de medida; es decir, la resolución de medida del Symphonie. Cuando solo hay conocimiento de los límites del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular, en la cual cada valor del intervalo de

variabilidad tiene la misma probabilidad. Al tratarse de una distribución rectangular, la incertidumbre de resolución se calcula dividiendo el semi-escalón de resolución por raíz de tres.

En la Tabla 3.2 se muestra el método de cálculo de las incertidumbres típicas de cada magnitud de entrada para componentes de incertidumbre tipo B.

Magnitud de entrada X_i	Fuente de incertidumbre	\pm Valor	Función de densidad de probabilidad <i>FDP</i>	Divisor d	Incertidumbre típica $u_B(X_i)$
T_1	Resolución	$(0,01/2)=0,005$	Rectangular	$\sqrt{3}$	$u_B(X_i) = \frac{\text{Valor}}{d}$
T_2	Resolución	$(0,01/2)=0,005$	Rectangular	$\sqrt{3}$	

Tabla 3.2 Incertidumbres típicas Tipo B de las magnitudes de entrada.

3.3.2.3. Determinación de las incertidumbres típicas combinadas de las magnitudes de entrada.

La determinación de las incertidumbres asociadas a las magnitudes de entrada con componentes de incertidumbre de Tipo A y de Tipo B, como es el caso de las magnitudes de entrada T_1 y T_2 , se realizó mediante el cálculo de sus incertidumbres típicas combinadas de la forma:

$$u(X_i) = \sqrt{u_A^2(X_i) + u_B^2(X_i)}$$

3.3.2.4. Evaluación de la incertidumbre típica por el Método de Monte Carlo.

Como ya se ha mencionado, las incertidumbres típicas de las magnitudes de entrada m_1 y m_2 se calcularon siguiendo el Método de Monte Carlo, implementando el modelo en Matlab. Con el programa implementado se obtuvieron los valores de m_1 y m_2 para cada una de las bandas de frecuencia de tercio de octava comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz de cada ensayo.

La norma UNE-EN ISO 354:2004 define el modelo matemático del coeficiente de atenuación sonora m (ecuación 7), a partir del coeficiente de atenuación sonora α , dado en la Norma Internacional ISO 9613-1:1993, empleando las condiciones climáticas de la cámara reverberante durante las mediciones (ecuaciones 8 a 14). Por tanto, las magnitudes de entrada de las que depende m son: la temperatura de la

cámara t y la humedad relativa h_r , medidas durante las mediciones del tiempo de reverberación de la cámara. La presión atmosférica también influye en el cálculo del coeficiente de atenuación sonora, aunque en menor medida.

En la Tabla 3.3 se pueden ver las magnitudes de entrada y sus correspondientes funciones de densidad de probabilidad (FDP) asociadas.

Magnitud de entrada	Descripción	Función de densidad de probabilidad
t_1	Temperatura del aire en la cámara reverberante vacía	Rectangular
t_2	Temperatura del aire en la cámara reverberante con la muestra de ensayo	Rectangular
h_{r1}	Humedad relativa en la cámara reverberante vacía	Rectangular
h_{r2}	Humedad relativa en la cámara reverberante con la muestra de ensayo	Rectangular

Tabla 3.3 Magnitudes de entrada y sus FDP asociadas.

La información disponible sobre las magnitudes de entrada t_1 , t_2 , h_{r1} y h_{r2} , eran sus límites de variabilidad debidos, tanto a la resolución del equipo de medida, el medidor de condiciones ambientales, como a los intervalos de variación entre los valores inicial y final de las condiciones climáticas registrados durante los ensayos. Por tanto, se asignaron FDP rectangulares a las magnitudes de entrada.

Se escogió $M = 10^6$ como número de reiteraciones porque según el suplemento 1 de la GUM, este valor suele proporcionar una cobertura del 95 %, tomando $p = 0,95$, para la magnitud de salida, de forma que la amplitud del intervalo es correcta con una o dos cifras decimales significativas. Además, también cumple la especificación de que M debe ser al menos 10^4 mayor que $1/(1 - p)$.

Para generar los 10^6 valores aleatorios de cada magnitud de entrada siguiendo una FDP rectangular, se utilizó la función *unifrnd* de Matlab, introduciendo como parámetros de entrada los extremos del intervalo de la distribución. Puesto que la distribución rectangular está centrada en el promedio de los valores medidos inicial y final de la temperatura y de la humedad relativa, los extremos del intervalo se calcularon como:

$$E_{\text{inf}} = \bar{x} - \left(\frac{res_x + |x_{\text{fin}} - x_{\text{ini}}|}{2} \right) \quad (34)$$

$$E_{\text{sup}} = \bar{x} + \left(\frac{res_x + |x_{\text{fin}} - x_{\text{ini}}|}{2} \right) \quad (35)$$

siendo

E_{inf} el extremo inferior del intervalo de la distribución rectangular;

E_{sup} el extremo superior del intervalo de la distribución rectangular;

x la magnitud de entrada considerada en cada caso, temperatura o humedad relativa;

x_{fin} el valor medido de la magnitud de entrada x tras realizar el ensayo;

x_{ini} el valor medido de la magnitud de entrada x antes de realizar el ensayo;

\bar{x} el valor promedio entre las medidas inicial y final de la magnitud de entrada x ;

res_x la resolución del equipo para la magnitud de entrada x .

La propagación de las FDP de las magnitudes de entrada se realizó evaluando el modelo para cada una de las M muestras obtenidas a partir de las FDP de las magnitudes de entrada t_1 , h_{r1} , t_2 , y h_{r2} , lo que proporciona los M valores de las FDP de las magnitudes de salida m_1 y m_2 .

La desviación típica de los 10^6 de m_1 , y de los 10^6 de m_2 , calculada mediante la función *std*, se corresponden con la estimación de las incertidumbres típicas $u(m_1)$ y $u(m_2)$.

El método de Monte Carlo aplicado para este caso fue simplificado, ya que la finalidad de su aplicación es la estimación de las incertidumbres típicas asociadas a las magnitudes m_1 y m_2 , y así, poderlas introducir en los cálculos del enfoque clásico

de la GUM. Por este motivo, se obviaron pasos del procedimiento como el cálculo de los intervalos de cobertura y_{\inf} e y_{\sup} para un intervalo de confianza $100p$ %.

3.3.3. Cálculo de la incertidumbre combinada.

La determinación de la incertidumbre típica del coeficiente de absorción sonora α_s , se obtuvo componiendo las incertidumbres típicas de las estimaciones de entrada como se describió en la ecuación 24. Para ello, fue necesario determinar primero los coeficientes de sensibilidad de cada magnitud de entrada, calculando las derivadas parciales de cada magnitud con respecto al modelo.

Los coeficientes de sensibilidad obtenidos se pueden ver en la Tabla 3.4:

Magnitud de entrada	Coeficiente de sensibilidad
T_1	$\frac{\partial \alpha_s}{\partial T_1} = \frac{55,3V}{T_1^2 c_1 S}$
T_2	$\frac{\partial \alpha_s}{\partial T_2} = -\frac{55,3V}{T_2^2 c_2 S}$
V	$\frac{\partial \alpha_s}{\partial V} = \frac{55,3}{T_2 c_2} - \frac{55,3}{T_1 c_1} - 4(m_2 - m_1)$
m_1	$\frac{\partial \alpha_s}{\partial m_1} = \frac{4V}{S}$
m_2	$\frac{\partial \alpha_s}{\partial m_2} = -\frac{4V}{S}$

Tabla 3.4 Magnitudes de entrada con sus coeficientes de sensibilidad.

La ecuación 24 se caracterizó para los dos casos de estudio, evaluando:

- La incertidumbre típica combinada $u_c(\alpha_s)$ considerando las tres magnitudes de entrada T_1 , T_2 y V :

$$u_c(\alpha_s) = \sqrt{[c_{T_1} \cdot u(T_1)]^2 + [c_{T_2} \cdot u(T_2)]^2 + [c_V \cdot u(V)]^2} \quad (36)$$

- La incertidumbre típica combinada $u_c(\alpha_s)$ considerando las cinco magnitudes de entrada T_1 , T_2 , V , m_1 y m_2 :

$$u_c(\alpha_s) = \sqrt{[c_{T_1} \cdot u(T_1)]^2 + [c_{T_2} \cdot u(T_2)]^2 + [c_V \cdot u(V)]^2 + [c_{m_1} \cdot u(m_1)]^2 + [c_{m_2} \cdot u(m_2)]^2} \quad (37)$$

En la Tabla 3.5 se muestran las incertidumbres típicas combinadas obtenidas para cada uno de los cinco ensayos, tanto para las 3 magnitudes de entrada (3 M.E.), ecuación 36, como para las 5 magnitudes de entrada (5 M.E.), ecuación 37. Además, también se puede ver la variación existente de los valores inicial y final de las condiciones climáticas durante cada ensayo.

	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3		Ensayo 4		Ensayo 5	
Frecuencia [Hz]	$u_c(\alpha_1)$ 3 M.E.	$u_c(\alpha_1)$ 5 M.E.	$u_c(\alpha_2)$ 3 M.E.	$u_c(\alpha_2)$ 5 M.E.	$u_c(\alpha_3)$ 3 M.E.	$u_c(\alpha_3)$ 5 M.E.	$u_c(\alpha_4)$ 3 M.E.	$u_c(\alpha_4)$ 5 M.E.	$u_c(\alpha_5)$ 3 M.E.	$u_c(\alpha_5)$ 5 M.E.
100	0,032	0,032	0,029	0,029	0,037	0,037	0,040	0,040	0,028	0,028
125	0,030	0,030	0,031	0,031	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030
160	0,030	0,030	0,035	0,035	0,025	0,025	0,029	0,029	0,031	0,031
200	0,031	0,031	0,037	0,037	0,026	0,026	0,045	0,045	0,029	0,029
250	0,037	0,037	0,052	0,052	0,052	0,052	0,034	0,034	0,039	0,039
315	0,030	0,031	0,028	0,028	0,037	0,037	0,034	0,034	0,045	0,045
400	0,029	0,029	0,046	0,046	0,045	0,045	0,028	0,028	0,038	0,038
500	0,038	0,038	0,039	0,039	0,034	0,034	0,040	0,040	0,047	0,047
630	0,030	0,030	0,041	0,041	0,038	0,038	0,027	0,027	0,040	0,040
800	0,025	0,025	0,045	0,045	0,035	0,035	0,028	0,028	0,037	0,037
1000	0,024	0,024	0,035	0,035	0,034	0,034	0,031	0,031	0,033	0,033
1250	0,024	0,024	0,038	0,038	0,038	0,038	0,036	0,036	0,036	0,036
1600	0,023	0,023	0,028	0,028	0,034	0,034	0,024	0,024	0,031	0,031
2000	0,020	0,021	0,032	0,032	0,030	0,030	0,025	0,026	0,035	0,035
2500	0,019	0,020	0,031	0,032	0,033	0,033	0,029	0,030	0,032	0,032
3150	0,018	0,021	0,032	0,032	0,027	0,028	0,032	0,034	0,030	0,032
4000	0,032	0,036	0,030	0,030	0,030	0,033	0,025	0,031	0,027	0,031
5000	0,034	0,043	0,055	0,056	0,046	0,050	0,046	0,054	0,036	0,043
	Variación de las condiciones ambientales:		Variación de las condiciones ambientales:		Variación de las condiciones ambientales:		Variación de las condiciones ambientales:		Variación de las condiciones ambientales:	
	t ₁ [°C]	0,0	t ₁ [°C]	0,5	t ₁ [°C]	0,5	t ₁ [°C]	0,8	t ₁ [°C]	0,6
	h _{r1} [%]	0,0	h _{r1} [%]	0,2	h _{r1} [%]	0,8	h _{r1} [%]	1,1	h _{r1} [%]	0,9
	t ₂ [°C]	0,6	t ₂ [°C]	0,1	t ₂ [°C]	0,2	t ₂ [°C]	0,9	t ₂ [°C]	0,4
	h _{r2} [%]	2,0	h _{r2} [%]	0,0	h _{r2} [%]	0,4	h _{r2} [%]	0,2	h _{r2} [%]	1,3

Tabla 3.5 Valores de la incertidumbre típica combinada obtenidos para cada ensayo con las 3 magnitudes de entrada y con las 5 magnitudes de entrada. Incluye la variación de las condiciones climáticas.

A la vista de los resultados de la Tabla 3.5, se aprecia como las magnitudes m_1 y m_2 , influyen en el cálculo de la incertidumbre, incrementando su valor en alta frecuencia, a partir de la banda de 3150 Hz. Precisamente, es en alta frecuencia donde el coeficiente de atenuación sonora α tiene mayor peso en el cálculo del coeficiente de absorción sonora α_s .

Además, si se observan las variaciones de las condiciones climáticas presentes en las realizaciones de los ensayos, se puede ver que variaciones en la humedad relativa afectan más a la incertidumbre que variaciones en la temperatura. Por ejemplo, en el ensayo 2, la humedad relativa es prácticamente la misma al inicio y al final de las medidas realizadas con la cámara vacía, y exactamente la misma para las medidas realizadas con la muestra en el interior de la cámara. En cambio, sí existen variaciones entre las temperaturas inicial y final de las magnitudes t_1 y t_2 , aunque estas variaciones no se ven prácticamente reflejadas en la incertidumbre, ya que su valor sólo se ve ligeramente incrementado (0,001) en el tercio de octava de 5000 Hz. Si ahora se observa el ensayo 3, se puede ver que las variaciones de las magnitudes t_1 y t_2 , son similares a las obtenidas en el ensayo 2, sin embargo, sí existe variación en las humedades relativas h_{r1} y h_{r2} . En este caso, la introducción de las magnitudes de entrada m_1 y m_2 en el cálculo de la incertidumbre, sí afecta al resultado obtenido.

Por tanto, se puede concluir que las magnitudes de entrada m_1 y m_2 , afectan en el cálculo de la incertidumbre del coeficiente de absorción sonora α_s en alta frecuencia, y es recomendable su introducción en el cálculo, sobre todo, en situaciones en las cuales las condiciones ambientales en el interior de la cámara hayan sufrido una gran variación durante el proceso de realización de los ensayos.

3.3.4. Cálculo de la incertidumbre expandida.

Para cada banda de frecuencia, se obtuvo la incertidumbre expandida U multiplicando la incertidumbre típica combinada $u_c(\alpha_s)$ por un factor de cobertura k que garantizase un nivel de confianza del 95 % ($p = 0,95$).

Puesto que los grados de libertad de los ensayos no eran infinitos se asumió que la función de densidad de probabilidad del coeficiente de absorción sonora α_s era una distribución t y se calcularon los grados de libertad efectivos ν_{eff} mediante la fórmula de Welch-Satterthwaite (ecuación 27).

Los factores de cobertura k para cada banda de frecuencia se determinaron usando la función de Excel *distr.t.inv* que devuelve el valor de la distribución t como función de la probabilidad (95 %) y los grados de libertad efectivos calculados.

3.4. Aplicación del método de Monte Carlo al ensayo.

La aplicación del método de Monte Carlo al ensayo tiene como finalidad validar los resultados de la incertidumbre obtenidos mediante el enfoque clásico de la GUM. Por ello se realizó el procedimiento adaptable, implementando un programa en Matlab que aplicase el método de Monte Carlo tantas veces como fuese necesario, hasta obtener unos resultados estabilizados para las bandas de tercio de octava en el rango de 100 Hz a 5000 Hz .

3.4.1. Modelo matemático.

La norma UNE-EN ISO 354 determina el coeficiente de absorción sonora α_s como se indica en la ecuación 17. Donde los coeficientes de atenuación sonora m_1 y m_2 se calculan siguiendo la ecuación 7, siendo α el coeficiente de absorción sonora de la atmósfera, obtenido mediante las ecuaciones de la Norma Internacional ISO 9613-1, a partir de las condiciones ambientales de temperatura y humedad relativa medidas en la cámara reverberante durante los ensayos (ecuaciones 8 a 14).

3.4.2. Determinación de las magnitudes de entrada al modelo.

A partir del modelo matemático se definieron las magnitudes de entrada de las que depende el coeficiente de absorción acústica α_s , asignándoles la función de densidad de probabilidad correspondiente a cada una de ellas.

Magnitud de entrada	Descripción	Función de densidad de probabilidad
t_1	Temperatura del aire en la cámara reverberante vacía	Rectangular
t_2	Temperatura del aire en la cámara reverberante con la muestra de ensayo	Rectangular
h_{r1}	Humedad relativa en la cámara reverberante vacía	Rectangular
h_{r2}	Humedad relativa en la cámara reverberante con la muestra de ensayo	Rectangular
T_1	Tiempo de reverberación medido en la cámara reverberante vacía	Normal
		Rectangular
T_2	Tiempo de reverberación medido con la muestra en la cámara reverberante	Normal
		Rectangular
V	Volumen de la cámara reverberante	Normal

Tabla 3.6 Magnitudes de entrada y sus funciones de densidad de probabilidad.

A las magnitudes de entrada se les asignaron una (o varias) FDP en función de los conocimientos disponibles de cada una, al igual que se hace en el enfoque clásico de la GUM. Aunque para el método Monte Carlo, no es necesario clasificar las componentes de incertidumbre en Tipo A y Tipo B.

Como ya se ha mencionado, los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal, por ello se asignó una FDP normal a las magnitudes de entrada V , T_1 y T_2 , debidas a las n observaciones independientes y caracterizadas por sus desviaciones típicas de la media, que representan la dispersión de las n mediciones. Además, a las magnitudes T_1 y T_2 , también se les asignó una FDP rectangular, debida a la resolución del equipo de medida, la cual especifica los límites del intervalo de variabilidad de las magnitudes de entrada, intervalo en el cual todos los valores son igualmente probables.

En cuanto a las magnitudes de entrada t_1 , t_2 , h_{r1} y h_{r2} , se le asignaron FDP rectangulares, como ya se ha explicado en el apartado 3.3.2.4. “Evaluación de la incertidumbre típica por el Método de Monte Carlo”, puesto que la información disponible sobre ellas eran sus límites de variabilidad debidos, tanto a la resolución del equipo de medida, como a los intervalos de variación entre los valores inicial y final de las condiciones climáticas registrados durante los ensayos.

3.4.3. Procedimiento adaptable.

A continuación se describen los pasos seguidos para la implementación en Matlab del procedimiento adaptable del método Monte Carlo. La determinación de la incertidumbre típica asociada al coeficiente α_s se realizó para las bandas de tercio de octava comprendidas entre 100 Hz y 5000 Hz, ambas incluidas, y para un nivel de confianza del 95 %.

3.4.3.1. Tolerancia numérica.

El cálculo de la tolerancia numérica δ se determinó a partir del número de cifras decimales significativas, n_{dig} , consideradas como imprescindibles para expresar el coeficiente de absorción acústica. Como la norma UNE-EN ISO 354 especifica que la incertidumbre del coeficiente de absorción acústica debe expresarse mediante el uso de dos cifras decimales significativas, se tomó $n_{dig} = 2$.

Para calcular la tolerancia numérica se tomaron como referencia los resultados obtenidos por el enfoque clásico de la GUM, expresando la incertidumbre del coeficiente de absorción acústica $u(\alpha_s)$ de la forma $c \times 10^l$

donde

c es un entero con 2 cifras decimales significativas.

l , en este caso, un entero igual a -2.

Aplicando la ecuación 29, se obtuvo una tolerancia numérica $\delta = 0,005$.

Puesto que el objetivo era la validación de los resultados de la incertidumbre obtenidos por el enfoque clásico de la GUM, se siguió la recomendación del *Suplemento* y se consideró una tolerancia numérica cinco veces menor a la calculada, resultando $\delta / 5 = 0,001$ el valor obtenido.

3.4.3.2. Número de reiteraciones M .

Se designó un valor de $M = 4 \times 10^5$, que cumple con la especificación del Suplemento 1 de la GUM de que M sea al menos 10^4 veces mayor que $1/(1-p)$.

3.4.3.3. Aplicación de las M reiteraciones de Monte Carlo.

En este apartado se describe el proceso llevado a cabo para la implementación en Matlab de una aplicación del método Monte Carlo; pero hay que tener en cuenta, que este proceso se repitió h veces (como mínimo dos), comprobando tras cada nueva aplicación la estabilidad de los resultados, tal y como se explica en el apartado 3.4.3.4. “*Estabilización de los resultados*”.

En el caso de las magnitudes afectadas por una única función de densidad de probabilidad, se generaron las 4×10^5 muestras aleatorias para cada magnitud de entrada en función de sus distribuciones de probabilidad asignadas. Para generar los valores de la FDP normal de la magnitud V , se utilizó la función *normrnd* de Matlab, introduciendo el promedio y la desviación típica de la media de las 9 mediciones. Para generar las 4×10^5 muestras de t_1 , t_2 , h_{r1} y h_{r2} siguiendo una función de densidad de probabilidad rectangular, se utilizó la función *unifrnd* de Matlab, introduciendo como parámetros de entrada los extremos del intervalo de la distribución. Puesto que la distribución rectangular se centró en el promedio de los valores medidos inicial y final de la temperatura y de la humedad relativa, se calcularon los extremos del intervalo según las ecuaciones 34 y 35.

Para obtener los M valores de las magnitudes de entrada afectadas por los dos tipos de distribución (normal y rectangular), como es el caso de los tiempos de reverberación T_1 y T_2 , primero se generaron los 4×10^5 valores aleatorios de la FDP normal mediante la función *normrnd*, introduciendo el promedio y la desviación típica de la media de las n mediciones, obteniendo una distribución normal de valores en torno al promedio de las 12 medidas (Figura 3.3).

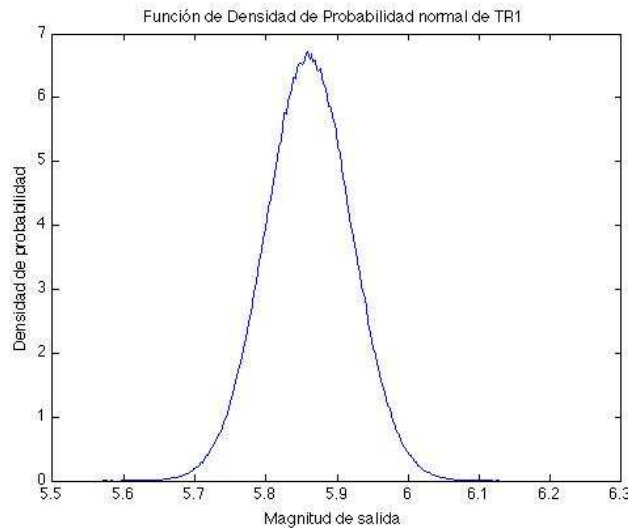


Figura 3.3 Función de densidad de probabilidad normal de T_1 .

Después, se generaron mediante la función *unifrnd*, los valores de la FDP rectangular debida a la resolución del equipo de medida, introduciendo en la función los extremos del intervalo de la distribución rectangular (Figura 3.4). En este caso, el error debido a la resolución no puede atribuirse a un único dato, como sucede con las otras magnitudes medidas (temperatura y humedad relativa), ya que los valores de T_1 y T_2 son el resultado de promediar todas las medidas realizadas, por tanto, el error afectará a los valores de la distribución normal y no solo al valor promedio. Por ello se aplicó el error debido a la resolución a los valores de la distribución normal que garantizasen una probabilidad del 95 %, definiendo los extremos del intervalo de la distribución rectangular centrada en torno al valor promedio, como:

$$E_{\text{sup}} = \bar{x} + \left(2s(\bar{x}) + \frac{res_x}{2} \right) \quad (38)$$

$$E_{\text{inf}} = \bar{x} - \left(2s(\bar{x}) + \frac{res_x}{2} \right) \quad (39)$$

siendo

E_{inf} el extremo inferior del intervalo de la distribución rectangular;

E_{sup} el extremo superior del intervalo de la distribución rectangular;

x la magnitud de entrada;

\bar{x} el valor promedio de la magnitud de entrada x ;

$s(\bar{x})$ la desviación típica de la media de las n medidas realizadas;

res_x la resolución del equipo para la magnitud de entrada x .

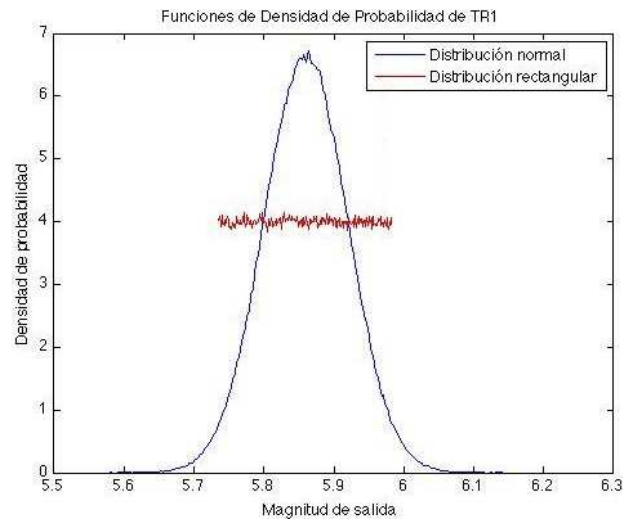


Figura 3.4 Funciones de densidad de probabilidad que afectan a T_1 .

Finalmente, se promediaron los valores resultantes de las dos distribuciones de probabilidad para obtener las M muestras de las magnitudes de entrada T_1 y T_2 , obteniendo una FDP normal, pero más estrecha (Figura 3.5).

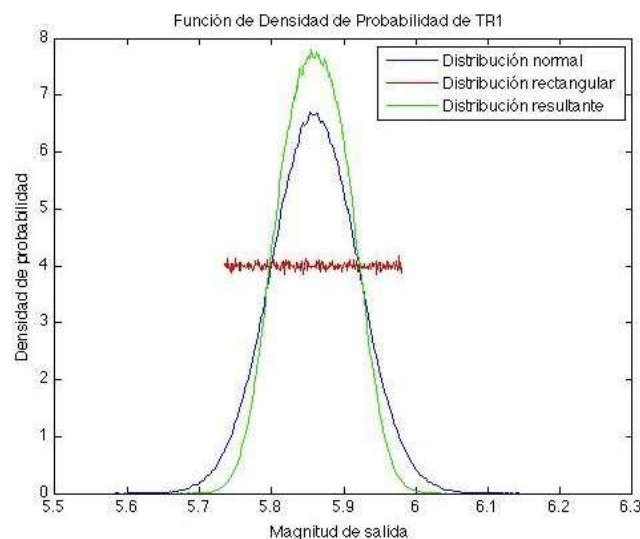


Figura 3.5 Propagación de las distribuciones normal y rectangular.

Una vez obtenidas las 4×10^5 muestras de las magnitudes de entrada, se propagaron sus FDP mediante el modelo para obtener la FDP de la magnitud de salida. Para ello se evaluó el modelo para cada una de las muestras, obteniendo los 4×10^5 valores del coeficiente de absorción sonora.

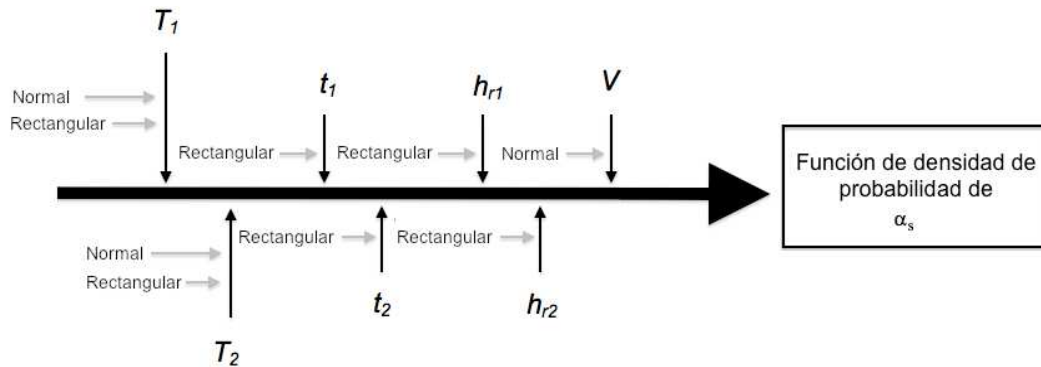


Figura 3.6 Propagación de distribuciones de las magnitudes de entrada para obtener la FDP del coeficiente de absorción acústica.

Finalmente, se ordenaron los 4×10^5 valores del coeficiente de absorción sonora en orden creciente mediante la función *sort* de Matlab y se le asignaron las probabilidades acumuladas uniformemente espaciadas, obteniendo así, la representación discreta G de la función de distribución del coeficiente de absorción sonora, a partir de la cual, se calcularon:

- La estimación de α_s como la media aritmética de los 4×10^5 valores, mediante la función *mean* de Matlab.
- La incertidumbre típica asociada a α_s como la desviación típica de los 4×10^5 valores mediante la función *std* de Matlab.
- El intervalo de cobertura para un nivel de confianza del 95 %, dado como el menor intervalo de cobertura ya que este es apropiado cuando la FDP de la magnitud de salida es simétrica o asimétrica. Para ello, se calcularon todos los intervalos de cobertura para una probabilidad del 95 % y seleccionó el intervalo de menor amplitud.

Cabe destacar, la necesidad de almacenar todos los resultados obtenidos para cada aplicación h del método, puesto que son necesarios tanto para la comprobación de la estabilidad de los cálculos, como para poder determinar los resultados finales.

Por tanto, para cada aplicación h del método de Monte Carlo se almacenaron cinco variables:

- El vector de los 4×10^5 valores del coeficiente de absorción sonora resultantes de la evaluación del modelo.
- $y^{(h)}$: La estimación de α_s .
- $u(y^{(h)})$: La incertidumbre típica asociada a α_s .
- $y_{\text{inf}}^{(h)}$: El límite inferior del intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 %.
- $y_{\text{sup}}^{(h)}$: El límite superior del intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 %.

3.4.3.4. Estabilización de los resultados.

La aplicación del método de Monte Carlo anteriormente descrito, se realizó tantas veces como fue necesario hasta conseguir unos resultados estabilizados; es decir, hasta que el doble de las desviaciones típicas asociadas a los resultados de las h aplicaciones fuesen inferiores a la tolerancia numérica $\delta / 5$.

Para ello, se aplicó el método de Monte Carlo dos veces ($h = 2$), obteniendo los resultados de cada secuencia, para poder calcular la desviación típica asociada a cada parámetro de los h valores obtenidos mediante la función *std*; es decir, se calculó:

- La desviación típica s_y asociada a las estimaciones de α_s $y^{(1)}$ e $y^{(2)}$.
- La desviación típica $s_{u(y)}$ asociada a las incertidumbres típicas de α_s $u(y^{(1)})$ y $u(y^{(2)})$.
- La desviación típica $s_{y_{\text{inf}}}$ asociada a los límites inferiores del intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 % $y_{\text{inf}}^{(1)}$ e $y_{\text{inf}}^{(2)}$.

- La desviación típica $s_{y\sup}$ asociada a los límites inferiores del intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 % $y_{\sup}^{(1)}$ e $y_{\sup}^{(2)}$.

Mientras cualquiera de los valores $2s_y$, $2s_{u(y)}$, $2s_{y\inf}$ y $2s_{y\sup}$ fuese superior al valor 0,001 de la tolerancia numérica, se debía aplicar una nueva iteración del método de Monte Carlo, repitiendo el proceso del cálculo de las desviaciones típicas de los h valores de los parámetros hasta poder considerar el cálculo como estabilizado.

Una vez estabilizado el cálculo, se emplearon los M valores obtenidos del modelo en cada iteración h de Monte Carlo; es decir, los $h \times 4 \times 10^5$ valores almacenados para calcular la estimación de α_s , la incertidumbre típica asociada a α_s y el menor intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 %.

En las Figuras 3.7 y 3.8 se muestra un ejemplo de los resultados obtenidos para el ensayo 1 del coeficiente de absorción sonora α_s en la frecuencia de 1000 Hz. En la Figura 3.7 se observa la representación discreta G de la función de distribución de α_s y en la Figura 3.8, la función de densidad de probabilidad. Las líneas discontinuas delimitan el menor intervalo de cobertura para α_s con una probabilidad del 95 %.

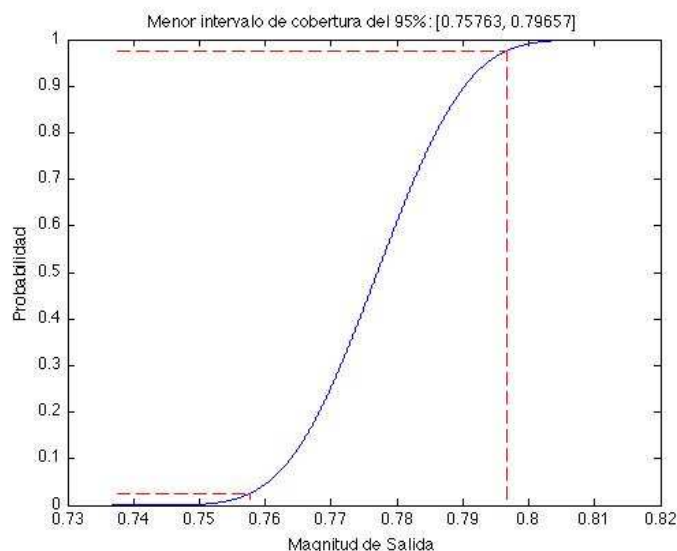


Figura 3.7 Representación discreta de la función de distribución de α_s .

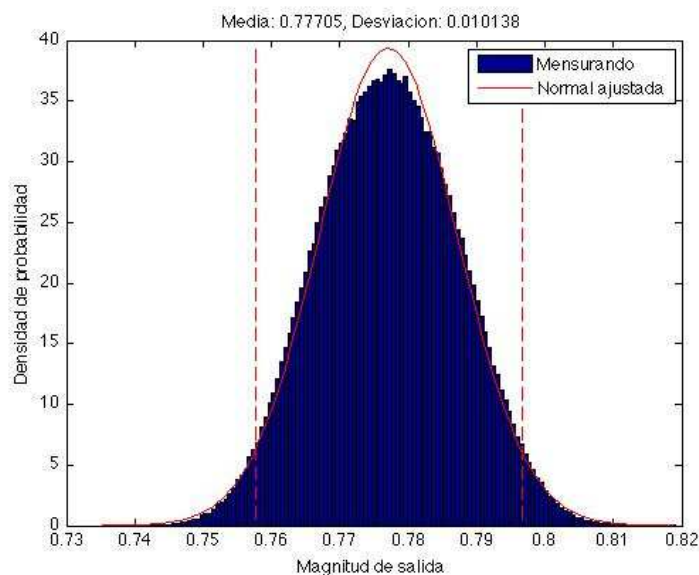


Figura 3.8 Función de densidad de probabilidad de α_s .

3.5. Resultados obtenidos y validación.

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la aplicación del enfoque clásico de la GUM sin contribuciones derivadas de términos de orden superior en la aproximación de Taylor a la función modelo (ecuación 33), así como los resultados proporcionados por el método de Monte Carlo adaptable, determinando el número M de reiteraciones automáticamente. Para cada ensayo, se utilizaron tanto el enfoque clásico de la GUM de primer orden, como el procedimiento de Monte Carlo adaptable para obtener una estimación del coeficiente de absorción acústica y , su incertidumbre típica asociada $u(y)$ y el menor intervalo de cobertura para una probabilidad del 95 % para y . Los resultados obtenidos para cada ensayo se muestran en las Tablas 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11, en las cuales EGUM representa el enfoque clásico de la GUM con términos de primer orden y MMC adaptable, el procedimiento de Monte Carlo adaptable.

En las Tablas 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 también se muestra si los resultados del MMC adaptable, validaron los obtenidos por el enfoque clásico de la GUM tras aplicar el procedimiento de validación del apartado 3.2.6. “Validación del enfoque GUM mediante el método de Monte Carlo. Monte Carlo adaptable” (columnas 13). Para ello se estableció una tolerancia numérica δ adecuada a $u(y)$ ($\delta = 0,005$ al considerar dos dígitos decimales significativos en $u(y)$), usándola para comparar el método de Monte Carlo con el enfoque clásico de la GUM. Los resultados del método de Monte

Carlo adaptable proporcionados fueron obtenidos para M reiteraciones del método empleando una tolerancia numérica $\delta/5$. Las magnitudes d_{inf} y d_{sup} de las diferencias absolutas entre los respectivos límites de los intervalos obtenidos por cada método (columnas 11 y 12), se calcularon mediante las ecuaciones 31 y 32.

Ensayo 1												
Método	EGUM				MMC Adaptable					Validación		
Frecuencia [Hz]	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	M	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	d _{inf}	d _{sup}	¿EGUM validado $\delta = 0,005$?
100	0,04	0,03	-0,02	0,11	1,2E+06	0,04	0,02	0,00	0,09	0,019	0,018	NO
125	0,15	0,03	0,09	0,21		0,15	0,02	0,10	0,20	0,018	0,018	
160	0,36	0,03	0,29	0,42		0,36	0,02	0,31	0,40	0,020	0,020	
200	0,41	0,03	0,35	0,48		0,41	0,02	0,37	0,45	0,023	0,022	
250	0,60	0,04	0,52	0,67		0,60	0,03	0,55	0,65	0,029	0,028	
315	0,72	0,03	0,66	0,79		0,72	0,02	0,68	0,76	0,024	0,024	
400	0,80	0,03	0,74	0,86		0,79	0,02	0,77	0,82	0,030	0,029	
500	0,78	0,04	0,71	0,86		0,78	0,02	0,74	0,83	0,033	0,033	
630	0,81	0,03	0,74	0,87		0,81	0,02	0,77	0,84	0,027	0,027	
800	0,77	0,02	0,72	0,83		0,77	0,01	0,75	0,80	0,025	0,025	
1000	0,78	0,02	0,73	0,82		0,78	0,01	0,76	0,80	0,030	0,030	
1250	0,71	0,02	0,66	0,76		0,71	0,01	0,68	0,73	0,024	0,024	
1600	0,69	0,02	0,65	0,74		0,69	0,01	0,67	0,72	0,023	0,023	
2000	0,66	0,02	0,62	0,71		0,66	0,01	0,64	0,68	0,023	0,023	
2500	0,65	0,02	0,60	0,69		0,65	0,01	0,63	0,66	0,023	0,023	
3150	0,58	0,02	0,54	0,62		0,58	0,01	0,55	0,60	0,016	0,017	
4000	0,46	0,04	0,39	0,53		0,47	0,03	0,41	0,53	0,014	0,014	
5000	0,60	0,04	0,51	0,69		0,60	0,04	0,52	0,67	0,006	0,007	

Tabla 3.7 Resultados obtenidos para el ensayo 1 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.

Ensayo 2												
Método	EGUM				MMC Adaptable					Validación		
Frecuencia [Hz]	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	M	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	d _{inf}	d _{sup}	¿EGUM validado $\delta = 0,005$?
100	-0,01	0,03	-0,07	0,05	1,6E+06	-0,01	0,02	-0,06	0,03	0,011	0,023	NO
125	0,13	0,03	0,06	0,19		0,12	0,02	0,07	0,17	0,012	0,022	
160	0,27	0,03	0,20	0,35		0,27	0,03	0,22	0,32	0,016	0,024	
200	0,43	0,04	0,35	0,51		0,43	0,03	0,38	0,49	0,021	0,028	
250	0,68	0,05	0,57	0,79		0,68	0,04	0,60	0,75	0,033	0,042	
315	0,75	0,03	0,69	0,80		0,75	0,02	0,71	0,78	0,021	0,027	
400	0,84	0,05	0,75	0,94		0,84	0,03	0,77	0,90	0,027	0,036	
500	0,90	0,04	0,82	0,98		0,90	0,03	0,84	0,95	0,023	0,032	
630	0,94	0,04	0,86	1,03		0,95	0,03	0,89	1,00	0,028	0,036	
800	0,94	0,04	0,85	1,04		0,94	0,03	0,88	1,00	0,030	0,038	
1000	0,94	0,04	0,86	1,01		0,94	0,02	0,89	0,98	0,028	0,035	
1250	0,87	0,04	0,79	0,95		0,88	0,03	0,82	0,92	0,025	0,032	
1600	0,89	0,03	0,83	0,94		0,88	0,01	0,86	0,90	0,033	0,038	
2000	0,92	0,03	0,85	0,98		0,92	0,02	0,88	0,95	0,027	0,034	
2500	0,92	0,03	0,86	0,99		0,92	0,02	0,89	0,95	0,033	0,038	
3150	0,83	0,03	0,76	0,89		0,83	0,02	0,78	0,86	0,024	0,031	
4000	0,61	0,03	0,55	0,67		0,61	0,02	0,57	0,64	0,023	0,030	
5000	0,59	0,06	0,48	0,71		0,59	0,05	0,49	0,68	0,012	0,030	

Tabla 3.8 Resultados obtenidos para el ensayo 2 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.

Ensayo 3												
Método	EGUM				MMC Adaptable				Validación			
Frecuencia [Hz]	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	M	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	d _{inf}	d _{sup}	¿EGUM validado $\delta = 0,005$?
100	0,06	0,04	-0,02	0,14	1,2E+06	0,06	0,03	0,00	0,11	0,018	0,025	NO
125	0,15	0,03	0,09	0,22		0,15	0,02	0,11	0,20	0,015	0,020	
160	0,36	0,02	0,30	0,41		0,35	0,02	0,32	0,39	0,017	0,020	
200	0,46	0,03	0,41	0,51		0,46	0,02	0,42	0,49	0,018	0,021	
250	0,71	0,05	0,60	0,82		0,71	0,04	0,63	0,78	0,036	0,040	
315	0,84	0,04	0,77	0,92		0,84	0,02	0,79	0,88	0,028	0,032	
400	0,90	0,04	0,80	0,99		0,89	0,03	0,83	0,95	0,031	0,036	
500	0,96	0,03	0,89	1,03		0,96	0,02	0,92	0,99	0,034	0,037	
630	0,99	0,04	0,91	1,07		0,99	0,02	0,94	1,03	0,032	0,036	
800	0,87	0,04	0,80	0,94		0,87	0,02	0,82	0,92	0,026	0,030	
1000	0,88	0,03	0,81	0,95		0,88	0,02	0,84	0,91	0,030	0,034	
1250	0,88	0,04	0,80	0,96		0,87	0,03	0,82	0,92	0,030	0,033	
1600	0,85	0,03	0,78	0,92		0,84	0,02	0,80	0,88	0,028	0,032	
2000	0,91	0,03	0,85	0,97		0,91	0,01	0,88	0,93	0,034	0,037	
2500	0,92	0,03	0,85	0,98		0,92	0,02	0,87	0,96	0,025	0,029	
3150	0,87	0,03	0,81	0,93		0,87	0,01	0,84	0,89	0,030	0,033	
4000	0,62	0,03	0,55	0,68		0,61	0,03	0,56	0,66	0,014	0,020	
5000	0,58	0,05	0,47	0,68		0,58	0,04	0,49	0,66	0,016	0,024	

Tabla 3.9 Resultados obtenidos para el ensayo 3 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.

Ensayo 4												
Método	EGUM				MMC Adaptable					Validación		
Frecuencia [Hz]	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	M	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	d _{inf}	d _{sup}	¿EGUM validado $\delta = 0,005$?
100	0,12	0,04	0,03	0,20	1,2E+06	0,11	0,03	0,05	0,17	0,016	0,027	NO
125	0,17	0,03	0,10	0,23		0,17	0,02	0,12	0,21	0,013	0,020	
160	0,31	0,03	0,24	0,37		0,31	0,02	0,26	0,35	0,016	0,020	
200	0,45	0,05	0,35	0,55		0,45	0,03	0,38	0,52	0,029	0,033	
250	0,57	0,03	0,50	0,64		0,57	0,02	0,52	0,62	0,022	0,025	
315	0,69	0,03	0,62	0,77		0,69	0,02	0,65	0,73	0,025	0,029	
400	0,85	0,03	0,79	0,91		0,84	0,02	0,81	0,87	0,028	0,031	
500	0,85	0,04	0,77	0,93		0,85	0,03	0,80	0,90	0,031	0,035	
630	0,86	0,03	0,80	0,91		0,86	0,02	0,83	0,89	0,025	0,028	
800	0,81	0,03	0,75	0,87		0,81	0,01	0,78	0,84	0,028	0,031	
1000	0,81	0,03	0,75	0,88		0,82	0,02	0,78	0,85	0,027	0,030	
1250	0,76	0,04	0,68	0,83		0,76	0,03	0,71	0,80	0,025	0,029	
1600	0,74	0,02	0,69	0,79		0,75	0,01	0,72	0,77	0,021	0,024	
2000	0,78	0,03	0,72	0,83		0,78	0,02	0,75	0,81	0,021	0,024	
2500	0,84	0,03	0,78	0,90		0,84	0,02	0,81	0,87	0,029	0,033	
3150	0,81	0,03	0,74	0,88		0,80	0,02	0,76	0,84	0,027	0,032	
4000	0,57	0,03	0,50	0,63		0,57	0,02	0,52	0,61	0,013	0,019	
5000	0,49	0,05	0,38	0,59		0,48	0,04	0,40	0,56	0,024	0,035	

Tabla 3.10 Resultados obtenidos para el ensayo 4 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.

Ensayo 5												
Método	EGUM				MMC Adaptable					Validación		
Frecuencia [Hz]	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	M	y	u(y)	y _{inf}	y _{sup}	d _{inf}	d _{sup}	¿EGUM validado $\delta = 0,005$?
100	-0,04	0,03	-0,10	0,01	1,2E+06	-0,05	0,02	-0,09	-0,01	0,012	0,019	NO
125	0,14	0,03	0,07	0,20		0,14	0,02	0,09	0,18	0,014	0,019	
160	0,25	0,03	0,19	0,32		0,25	0,02	0,21	0,30	0,018	0,023	
200	0,41	0,03	0,35	0,47		0,41	0,02	0,36	0,45	0,015	0,020	
250	0,60	0,04	0,52	0,68		0,60	0,03	0,55	0,65	0,029	0,033	
315	0,80	0,05	0,71	0,90		0,80	0,03	0,74	0,86	0,032	0,036	
400	0,86	0,04	0,78	0,94		0,86	0,02	0,81	0,90	0,032	0,036	
500	1,03	0,05	0,93	1,13		1,03	0,03	0,96	1,09	0,034	0,039	
630	0,97	0,04	0,89	1,05		0,97	0,02	0,92	1,01	0,037	0,041	
800	0,90	0,04	0,82	0,97		0,89	0,03	0,84	0,94	0,028	0,032	
1000	0,91	0,03	0,84	0,98		0,91	0,02	0,87	0,95	0,027	0,031	
1250	0,89	0,04	0,82	0,97		0,90	0,02	0,85	0,93	0,032	0,036	
1600	0,87	0,03	0,80	0,93		0,87	0,02	0,83	0,90	0,031	0,034	
2000	0,89	0,04	0,82	0,97		0,89	0,02	0,84	0,94	0,024	0,029	
2500	0,95	0,03	0,88	1,02		0,95	0,02	0,92	0,98	0,031	0,035	
3150	0,88	0,03	0,82	0,95		0,88	0,02	0,84	0,92	0,022	0,027	
4000	0,59	0,03	0,53	0,65		0,60	0,02	0,55	0,64	0,016	0,022	
5000	0,57	0,04	0,48	0,66		0,58	0,04	0,50	0,64	0,007	0,017	

Tabla 3.11 Resultados obtenidos para el ensayo 5 de la etapa de cálculo para el modelo del coeficiente de absorción acústica del enfoque clásico de la GUM (EGUM) y del método de Monte Carlo (MMC) adaptable.

Los resultados muestran que, aunque el enfoque clásico de la GUM y el método de Monte Carlo dan estimaciones concordantes del coeficiente de absorción acústica, los valores numéricos para las incertidumbres típicas asociadas son ligeramente diferentes. Los valores de las incertidumbres proporcionados por el enfoque clásico de la GUM son mayores que los proporcionados por el método de Monte Carlo. Este último es por lo tanto más optimista.

Además, también se puede observar que los resultados obtenidos por el método de Monte Carlo no fueron validados para la tolerancia numérica $\delta = 0,005$, ya que tanto d_{inf} como d_{sup} , tomaron valores superiores.

En las Figuras 3.9 a 3.13, se muestran de forma gráfica los valores de la incertidumbre asociados a los coeficientes de absorción sonora de cada uno de los cinco ensayos, obtenidos tanto por el enfoque clásico de la GUM, como por el método de Monte Carlo adaptable. La representación gráfica de las incertidumbres obtenidas permite apreciar con claridad como los resultados obtenidos por ambos métodos siguen la misma tendencia, siendo los valores correspondientes al enfoque clásico de la GUM ligeramente superiores a lo largo de todo el rango de frecuencia.

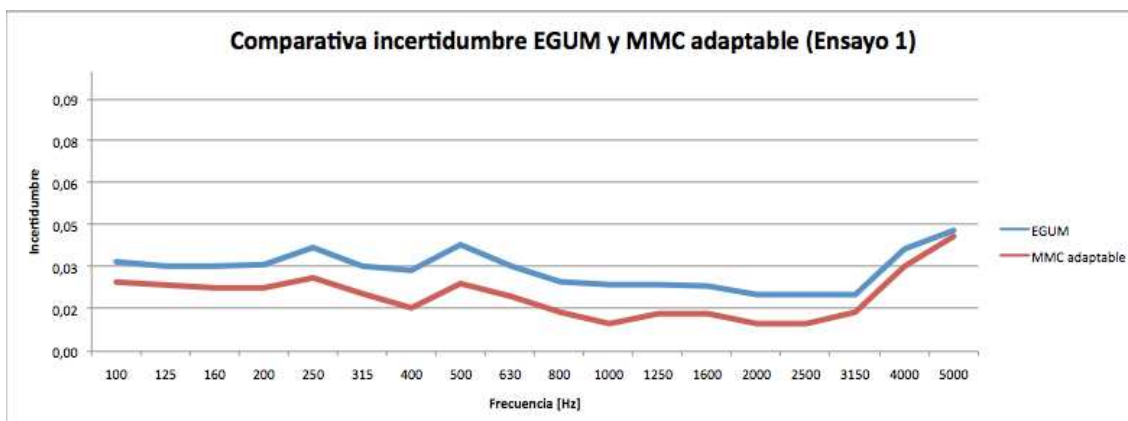


Figura 3.9 Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 1 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.

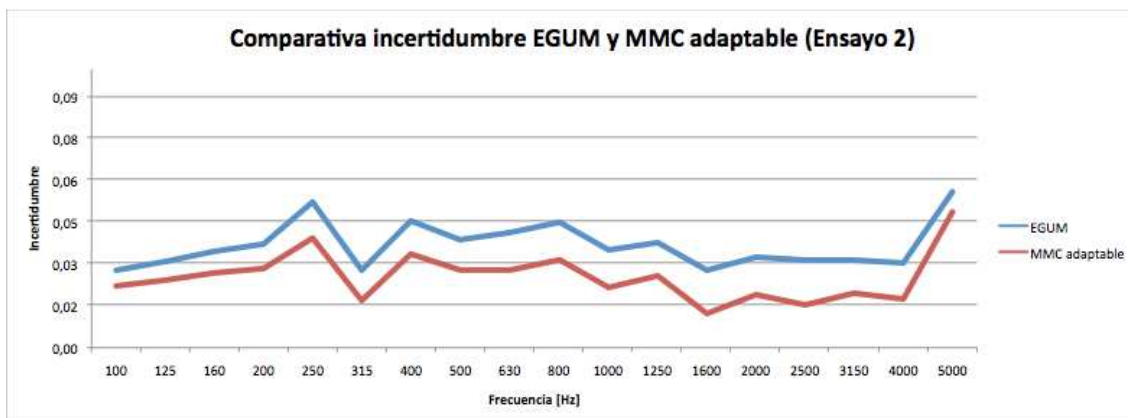


Figura 3.10 Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 2 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.

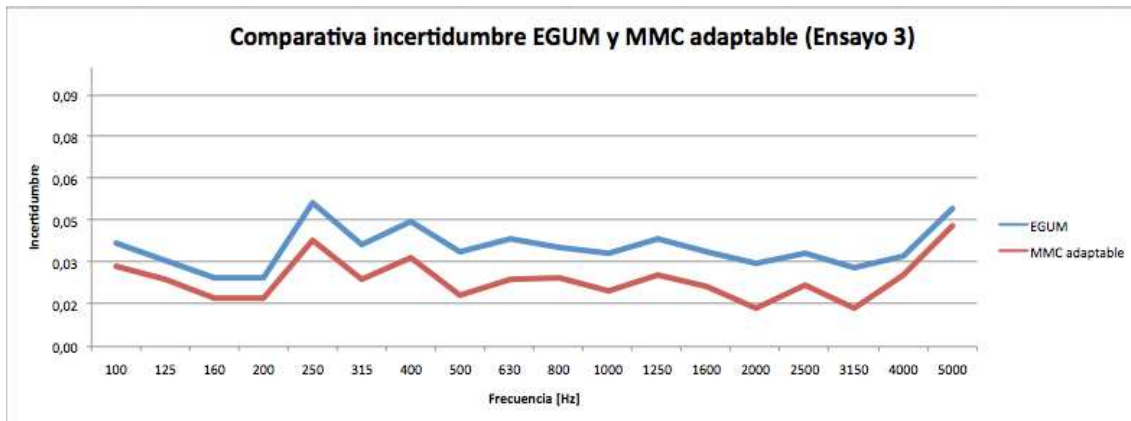


Figura 3.11 Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 3 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.

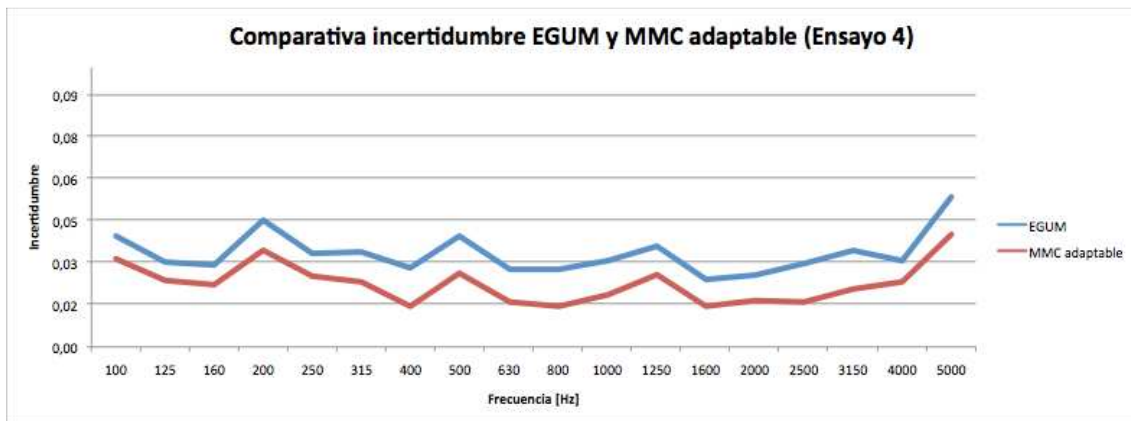


Figura 3.12 Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 4 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.

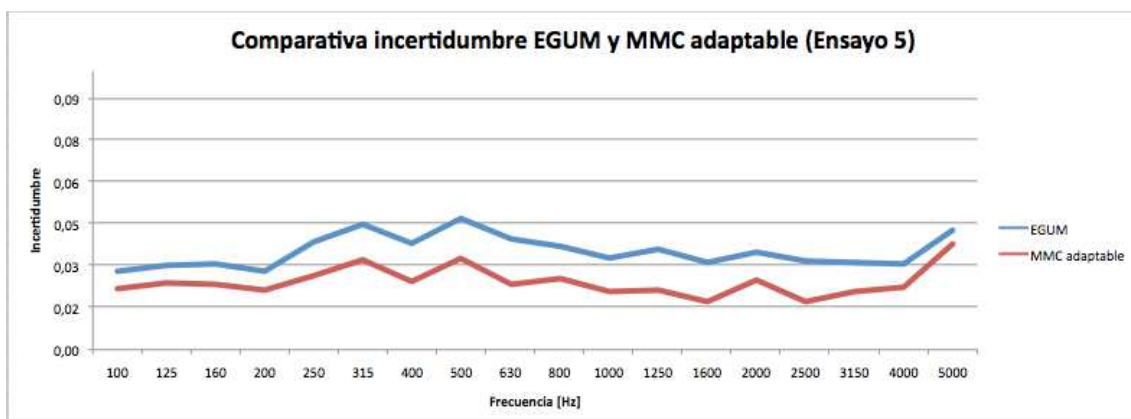


Figura 3.13 Valores de incertidumbre asociados al resultado del ensayo 5 obtenidos mediante el método GUM y el método Monte Carlo adaptable.

Los resultados de la evaluación de la incertidumbre obtenidos por ambos métodos están correlacionados, puesto que siguen la misma tendencia a lo largo de todo el rango de frecuencia, únicamente los separa un valor casi constante, siendo los valores correspondientes al enfoque clásico de la GUM ligeramente superiores.

4 Estudio de trazado de rayos de la cámara reverberante del CEIS

4.1. Introducción.

La precisión en la medición de la absorción acústica en cámaras reverberantes según la norma UNE-EN ISO 354 está aún bajo investigación. Hasta ahora la mayoría de los ensayos interlaboratorios han proporcionado una gran variabilidad en los resultados del cálculo, obteniendo una gran diferencia entre mediciones de la absorción acústica de los laboratorios en cámara reverberante. Por tanto, a pesar de que se realizaron numerosas investigaciones, no se pudieron dar resultados fiables de precisión en relación con el método de medición, por lo que la norma UNE-EN ISO 354:2004 todavía no aborda los datos de precisión del método.

Un grupo de trabajo ISO ha empezado a investigar posibles mejoras del método para adoptar medidas que reduzcan la dispersión de los resultados, ya sea mediante el uso de un material de referencia, o corrigiendo el camino libre medio de la cámara. Se sabe que la insuficiencia de difusión en el campo sonoro de la cámara reverberante una vez introducida la muestra de ensayo, la forma de la cámara reverberante y la colocación de los difusores influyen en los resultados del método [12].

Con el fin de analizar las causas de dispersión que afectan a la medida del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, se realizó un estudio, mediante el programa de simulación acústica EASE, de la influencia que produce en el campo sonoro de la cámara reverberante del Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS), la introducción de un material absorbente en su interior. Para ello se realizaron simulaciones mediante trazado de rayos tanto con la cámara vacía, como con la muestra del material lana de roca de 50 *mm* de espesor de Rockwool, ya estudiada en los ensayos del capítulo 2 del proyecto, en su interior.

El programa de simulación acústica EASE (Electro-Acoustic Simulator for Engineers) es un software desarrollado por el grupo ADA (Acoustic Design Anherth) y distribuido por la empresa Renkus-Heinz Inc. EASE es un software comercial que permite el estudio del comportamiento acústico de los recintos e incluye numerosas herramientas acústicas de diseño y de análisis.

El principal motivo por el cual se usó la cámara reverberante del CEIS para realizar este estudio, en lugar de la cámara de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación (ETSIST), es que el CEIS es un laboratorio acreditado por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC) para la

realización de ensayos de medida de la absorción acústica en cámara reverberante según la UNE-EN ISO 354:2004, por lo que dicha cámara sí que cumple los requisitos exigidos por la norma. Además, fue uno de los 14 laboratorios participantes en la intercomparación AQUUS_ABSORPTION_1 [4].

El desarrollo del estudio se puede dividir en cuatro fases:

- 1) Construcción del modelo del recinto.
- 2) Aplicación del trazado de rayos en la simulación del modelo.
- 3) Procesado de los datos mediante Matlab.
- 4) Análisis de los resultados de la simulación una vez procesados en Matlab.

4.2. Construcción del modelo del recinto.

El Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS) facilitó el modelo de su cámara reverberante de 235 m^3 para la realización del estudio del campo sonoro. Sin embargo, el modelo proporcionado no estaba actualizado y no incluía los 11 difusores que actualmente se utilizan en la cámara reverberante para alcanzar el grado de difusividad adecuado de la cámara en la realización de los ensayos de medida del coeficiente de absorción acústica según la norma UNE-EN ISO 354. Por tal motivo, se trabajó sobre el modelo original (Figura 4.1) añadiendo los 11 difusores suspendidos en el techo de la cámara, obteniendo así, un modelo que se aproximase más a las condiciones reales de la cámara.

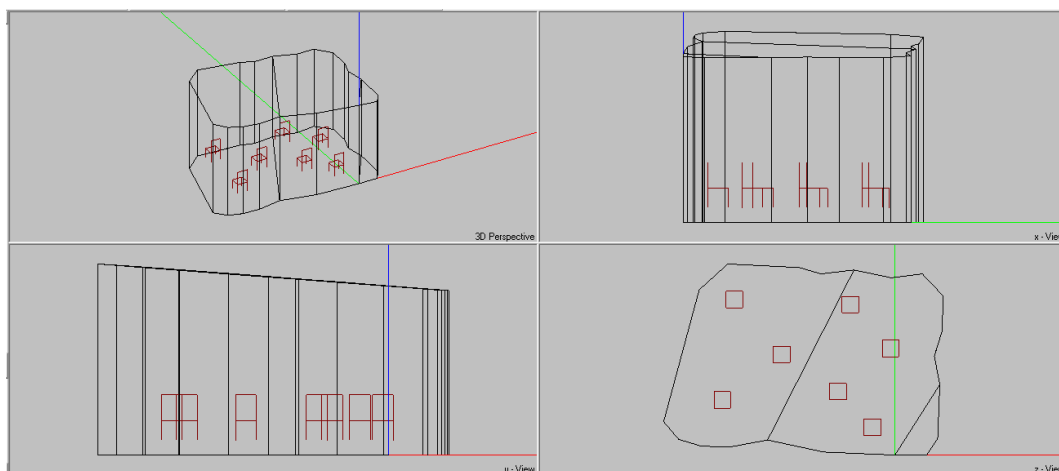


Figura 4.1 Modelo original de la cámara reverberante del CEIS.

Antes de empezar a realizar cambios en el modelo del recinto, lo primero que se hizo fue verificar que el recinto estuviese en modo abierto. Normalmente el modelado de los recintos se realiza en el modo “Recinto Abierto” (*Room Open*), ya que cuando un recinto está cerrado el programa EASE espera que el recinto ya se encuentre finalizado y comprueba de forma rutinaria si hay agujeros, si faltan superficies, si las superficies no son planas, etc. Esto genera numerosos mensajes de error cuando el modelo está todavía en construcción. La forma de prevenir la mayoría de estos mensajes es hacer el modelado en el modo “Recinto Abierto” y cerrar el recinto una vez se haya completado.

Para introducir los difusores en el diseño, se tuvo en cuenta la altura y la curvatura de cada uno de ellos en la cámara reverberante del CEIS. Como en el EASE solamente se pueden crear superficies planas, cada difusor se creó a partir de varias superficies planas unidas de forma que fuesen recreando la curvatura e inclinación aproximadas a su colocación real (Figura 4.2). Además, los difusores son superficies que tienen las dos caras cubiertas con el mismo material (PVC), por lo que se marcaron como doble cara (*two fold*) en las opciones de las superficies.



Figura 4.2 Difusores de la cámara reverberante del CEIS.

Se creó la superficie correspondiente a la muestra del material de lana de roca de forma que cumpliese con los requisitos, en cuanto a forma, tamaño y colocación, de la norma UNE-EN ISO 354 (apartado 2.3.2.2. “*Muestra de ensayo*”). Por tanto, se añadió en el centro del suelo del recinto una superficie rectangular de $3 \times 4 \text{ m}$, área de 12 m^2 , con una relación ancho/largo de 0,75, considerando el área de la muestra como una superficie pegada a otra superficie principal, en este caso el suelo, indicando en el programa EASE que era capa de otra superficie (*is coat of*).

Para poder realizar unos cálculos acústicos en EASE que se asemejasen en la mayor medida posible con la realidad, se incluyeron en la base de datos del proyecto la absorción de los materiales correspondientes a la muestra de ensayo, “lana de roca”, y a los difusores, “PVC”. Para el material “lana de roca” se utilizó el valor asignado a la muestra de dicho material en la intercomparación AQUS_ABSORPTION_1 (referencia bibliográfica), ya que son más fiables que los obtenidos mediante los ensayos realizados en la cámara de la ETSIST (apartado 2.4.5. “*Resultados obtenidos*”). Para obtener unos valores aproximados del coeficiente de absorción acústica de los difusores, se realizó un ensayo en la cámara reverberante de la ETSIST siguiendo la norma UNE-EN ISO 354, cuyos resultados se pueden consultar en el Anexo A.

Con el modelo ya creado, se introdujeron las localizaciones específicas dentro del recinto, “Asientos de oyente” (*Listener Seat*), en los puntos de estudio en los cuales se querían realizar las simulaciones mediante trazado de rayos (*Ray Tracing*). Puesto que lo que se pretendía era observar la influencia en el campo sonoro del recinto una vez introducido el material absorbente en la cámara reverberante, los puntos de estudio se situaron próximos a la muestra, colocando cuatro “Asientos de oyente” alrededor de la muestra con alturas variables entre 1 m y 1,5 m, y otro en el centro de la misma a 20 cm de altura, para observar así, el campo cercano a la muestra. Además, para poder llevar a cabo las simulaciones mediante trazado de rayos, se introdujeron dos altavoces omnidireccionales encargados de generar los rayos usados en las simulaciones.

Una vez completado el modelo, se cerró el recinto para poder ejecutar las simulaciones. Si EASE encuentra agujeros, alguna superficie mal unida o cualquier otro error en el modelo, muestra un mensaje en el que informa sobre la naturaleza del problema. Si por el contrario, no detecta ningún error, indica el volumen de la sala.

En la Figura 4.3, se muestra el modelo de la cámara reverberante del CEIS tras haber sido modificado acorde con las exigencias requeridas para el propósito de este trabajo.

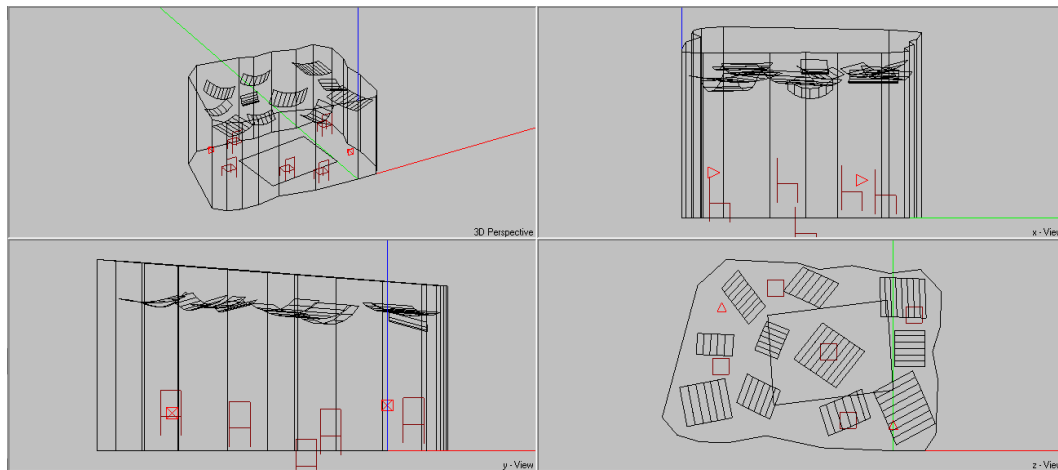


Figura 4.3 Modelo de la cámara reverberante del CEIS usado en el estudio.

4.3. Aplicación del trazado de rayos en la simulación del modelo.

La introducción de material absorbente en el interior de una cámara reverberante reduce la longitud de la trayectoria de los rayos, y por tanto, el camino libre medio. Este efecto no se tiene en cuenta en el cálculo de la absorción a partir de los tiempos de reverberación medidos, ya que el cálculo considera que las características de la cámara reverberante son similares antes y después de la introducción del material absorbente. Sin embargo, se sabe que la difusión del campo sonoro es insuficiente tras introducir el absorbente en la cámara reverberante [paper], por lo tanto, sí se realizan cambios en el comportamiento de los rayos sonoros en el interior de la cámara. Este estudio, pretende analizar el efecto en el campo sonoro de la cámara reverberante del CEIS tras la introducción del material altamente absorbente, lana de roca de 50 *mm* de espesor de Rockwool.

Para estudiar cómo se comportan los rayos sonoros en la cámara reverberante del CEIS tras la introducción del material absorbente lana de roca, se hicieron dos grupos de simulaciones mediante la herramienta de análisis de EASE “Trazado de Rayos” (*Ray Tracing*). En primer lugar, se calcularon las trayectorias de los rayos entre cada uno de las dos fuentes sonoras y cada uno de los cinco puntos de estudio con la cámara vacía, asignando a la superficie correspondiente a la muestra de lana de roca el mismo coeficiente de absorción que el del suelo de la cámara. Después, se volvieron a realizar los mismos cálculos, pero cambiando el coeficiente de absorción de la muestra por el material “lana de roca”.

4.3.1. Herramienta Impactos del Trazado de Rayos (*Ray Tracing Impacts*).

Como ya se ha mencionado, se utilizó el módulo de “Trazado de Rayos” (*Ray Tracing*) de EASE para estudiar la propagación de los rayos sonoros en la cámara reverberante del CEIS. El trazado de rayos permite estudiar patrones de reflexión dentro de una sala mediante la emisión de rayos en un recinto, trazando la trayectoria de cada rayo hasta alcanzar unos límites predeterminados.

En concreto, se hizo uso de la opción “Impactos del Trazado de Rayos” (*Ray Tracing Impacts*) para calcular las trayectorias de los rayos entre las fuentes sonoras y los puntos seleccionados, asientos del oyente, para la realización del estudio. Esta opción del módulo *Ray Tracing* captura todos los rayos que pasan a través de una esfera de radio de 1 metro que rodea cada asiento, almacenando los resultados en un archivo tipo impacto (*.mpc). Para producir la cantidad de rayos necesarios para el estudio de los caminos de los rayos, esta rutina requiere la emisión de al menos 100.000 rayos por altavoz, y al menos un orden de reflexión igual a 10. El tiempo de cálculo es proporcional al número de caras; es decir, si se duplican el número de caras, se duplica el tiempo de la simulación.

4.3.2. Parámetros a obtener en las simulaciones.

El software EASE proporciona la información resultante del proceso de simulación en forma de tabla, cuyo contenido depende de los ajustes realizados en las opciones del módulo de Trazado de Rayos. En la Figura 4.4 se muestran los parámetros que se seleccionaron para cada rayo simulado en el modelo.

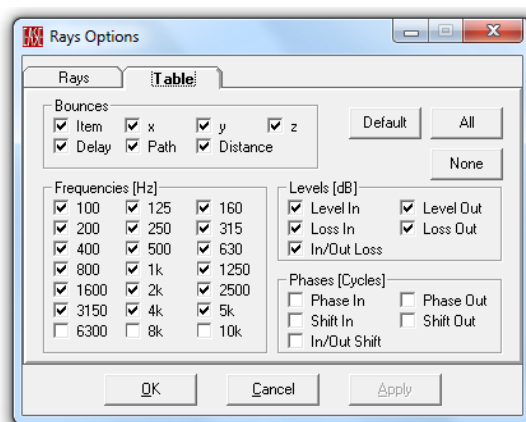


Figura 4.4 Configuración de los parámetros resultantes de la simulación para cada rayo.

En el cuadro “Impactos” (*Bounces*) se seleccionaron los datos básicos referentes a cada rayo:

- Elementos (*Items*): Muestra en cada fila de la tabla los elementos que intervienen en el recorrido realizado por cada rayo, desde el altavoz que lo ha emitido, hasta el punto de estudio, pasando por cada una de las superficies en las que se refleja.
- Retardo (*Delay*): Tiempo desde que el rayo ha sido emitido hasta llegar a un elemento o superficie del recinto.
- Coordenadas x, y, z (*X, Y, Z*): Punto donde se encuentra el altavoz o coordenadas del punto donde se refleja el rayo en una superficie.
- Camino (*Path*): Muestra el camino total en metros del rayo entre el emisor (altavoz) y el punto de extinción (asiento de oyente).
- Distancia (*Distance*): Distancia entre el altavoz y el primer punto de rebote en una superficie o entre dos puntos rebote.

En el cuadro “Frecuencias” (*Frequencies*) se seleccionó el margen de frecuencia a estudiar. En este caso se seleccionaron las bandas de tercio de octava de 100 *Hz* a 5000 *Hz*.

En el cuadro “Niveles” (*Levels*) se seleccionó la información detallada referente a la energía de los rayos, desde su emisión en el altavoz hasta su llegada al punto de estudio:

- *Level In*: Nivel del rayo emitido antes de chocar contra una superficie.
- *Level Out*: Nivel del rayo emitido después de chocar contra una superficie.
- *Loss In*: Pérdida de energía total del rayo, relativa a la fuente, a lo largo de la trayectoria antes de impactar contra una superficie.
- *Loss Out*: Pérdida de energía total del rayo, relativa a la fuente, a lo largo de la trayectoria después de impactar contra una superficie.
- *In/Out Loss*: Pérdida interna de energía debida a la absorción del material de la superficie en la que se refleja el rayo.

La información obtenida en cada simulación se exportó a ficheros de texto para su posterior procesamiento en Matlab.

4.3.3. Configuración del trazado de rayos.

Tras seleccionar la opción de Impactos del Trazado de Rayos en el módulo de Trazado de Rayos, se establecieron los parámetros de la simulación siguiendo las pantallas de configuración del programa (Figura 4.5 y 4.6).

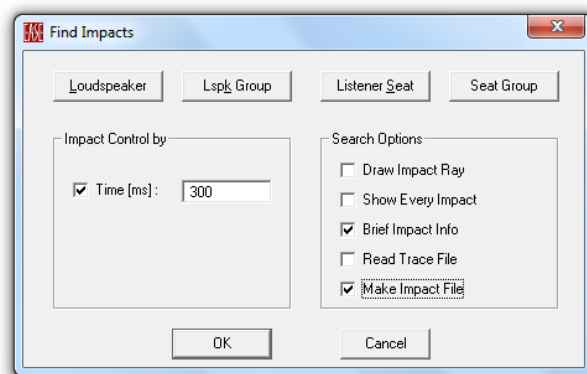


Figura 4.5 Configuración de los parámetros de impactos del trazado de rayos.

Aunque EASE permite realizar el cálculo del trazado de rayos con varios altavoces y diferentes asientos de oyente seleccionados en una única simulación, no se usaron los dos altavoces y los cinco puntos de estudio en un mismo cálculo, sino que se optó por realizar un total de 10 simulaciones, una por cada altavoz y asiento de oyente del modelo, facilitando así el posterior procesamiento de los datos. Mediante los botones “Loudspeaker” y “Listener Seat” se seleccionaron el altavoz ($S1$ o $S2$) y el asiento de oyente ($L1$, $L2$, $L3$, $L4$ o $L5$) usados en cada uno de los cálculos.

La sección “Impactos Controlados Por” (*Impact Control by*) establece el criterio que determina cuando un rayo termina su recorrido en el cálculo. El tiempo introducido en la casilla “Time” estableció la longitud de la investigación, 300 ms , determinando que el tiempo máximo de la trayectoria de un rayo tras la llegada del primer impacto no sería superior a 300 ms .

El cuadro “Opciones de Búsqueda” (*Search Options*) contiene las opciones que determinan qué datos del cálculo serán guardados y su representación. Solamente se seleccionaron las casillas “Información Breve del Impacto” (*Brief Impact Info*), que muestra la trayectoria, el nivel y el tiempo de llegada de cada rayo mientras se realiza

el proceso de cálculo, y “Crear un Archivo de Impactos” (*Make Impact File*) que guarda todos los rayos que llegan al oyente en un archivo de impacto (*.mpc) para su posterior análisis y visualización. No se marcaron las opciones de “Mostrar Cada Impacto” (Show Every Impact) ni de “Dibujar Impacto de Rayos” (Draw Impact Ray), ya que el objetivo era crear un archivo con la información de los impactos, y estas opciones solo alargarían el tiempo de cálculo de manera significativa sin servir a ningún propósito real.

Finalmente se realizó la configuración de los parámetros del Trazado de Rayos (Figura 4.6).

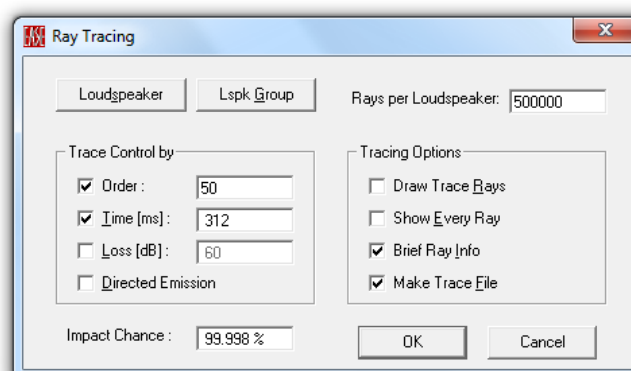


Figura 4.6 Configuración de los parámetros del trazado de rayos.

En el campo “Rayos por Altavoz” (Rays per Loudspeaker) se determinó cuántos rayos debía emitir el altavoz seleccionado en la simulación. Se debe tener en cuenta, que cuanto mayor sea el número de rayos emitidos por el altavoz, mayor será el tiempo de cálculo.

En la sección “Trazado Controlado Por” (*Trace Control by*) se establecieron los parámetros de corte de los rayos en la simulación. En la casilla “Orden” (*Order*) se determinó el número máximo de reflexiones (50) que el programa debía trazar, antes de pasar al siguiente rayo. La casilla “Tiempo” (*Time*) establece el tiempo total de la trayectoria que recorre un rayo antes de considerar su trazado completado. Este tiempo lo determina el programa automáticamente al haber introducido en el menú anterior, Figura 4.5, el periodo de tiempo máximo desde el primer impacto, 300 *ms*. Este tiempo es mayor, puesto que se trata del tiempo total de la trayectoria, por lo que incluye, además de los 300 *ms*, el tiempo que tarda en llegar al oyente el primer impacto.

La casilla “Probabilidad de Impacto” (*Impact Chance*) indica la probabilidad de que los impactos se produzcan en los oyentes frente a todos los impactos posibles. EASE revisa los parámetros de la configuración y utiliza este campo para informar al usuario cuáles son las probabilidades de registrar todos los posibles impactos. Obviamente, cuanto mayor sea el porcentaje más precisa será la simulación. Por ello se establecieron 500.000 rayos por altavoz, obteniendo una probabilidad de impacto del 99 %.

La sección de “Opciones del Trazado” (*Tracing Options*) controla las funciones de visionado y almacenado de datos. Se seleccionaron las casillas “Información Breve del Rayo” (*Brief Ray Info*), que muestra una breve información sobre cada rayo durante la simulación y “Crear un Archivo de Trazado” (*Make Trace File*) para guardar en un archivo de trazado (*.trc) todos los rayos de la simulación.

Se realizaron simulaciones de prueba del modelo para establecer una configuración adecuada de los criterios de corte de los rayos en el cálculo, tiempo y orden, ajustando los parámetros hasta obtener una visualización de los rayos en el ecograma satisfactoria (Figura 4.7). En primer lugar, se estableció el tiempo de análisis que permitiese observar una caída de nivel, desde el rayo directo hasta el último rayo en llegar al punto de estudio, de al menos 30 *dB*. Por este motivo, se estableció un marco temporal de 300 *ms*. Después, se aumentó el número de reflexiones hasta observar durante todo el periodo temporal que conforma el ecograma, llegadas de rayos al punto de estudio; es decir, hasta obtener un ecograma sin carencia de rayos en intervalos temporales. Tras realizar varias pruebas, se estableció como orden máximo de reflexión de los rayos el valor 50.

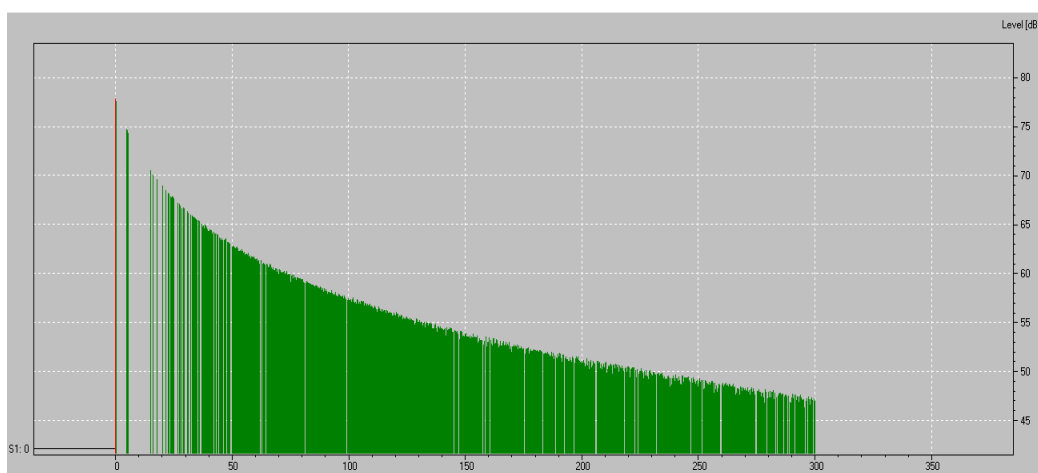


Figura 4.7 Ecograma obtenido en la simulación de la cámara vacía con el altavoz *S1* en el punto *L1*, para un tiempo de 300 *ms* y orden 50.

Tras finalizar las simulaciones, se exportaron los datos almacenados en los archivos de impacto a ficheros de texto para poder procesar y analizar la información obtenida en los cálculos.

4.4. Procesado de los datos mediante Matlab.

Debido a la extensa información contenida en cada fichero proporcionado por el EASE, se optó por la creación de un programa en Matlab para procesar los datos obtenidos en las simulaciones, permitiendo realizar el análisis de la información de una manera más simplificada. De esta forma, se implementó una herramienta básica, que puede facilitar el procesado de datos de futuros estudios de trazado de rayos. Evidentemente, el programa deberá adaptarse a las necesidades que persiga la finalidad de cada estudio.

La implementación del programa se puede dividir en tres fases: Importación, procesado y exportación de los datos.

Para poder trabajar con los datos de las simulaciones en el software Matlab, lo primero que se hizo fue importar los ficheros de texto al programa. Como ya se ha mencionado, por cada altavoz y cada punto de estudio simulado se obtuvo un fichero de texto. Cada fichero contiene un listado detallado con todos los parámetros considerados de interés para el análisis de todos los rayos emitidos por el altavoz que llegaron al punto de estudio (ver el apartado 4.3.2. “*Parámetros a obtener en las simulaciones*”).

En la Tabla 4.1, se puede ver un extracto de la información de los rayos correspondiente a la simulación de la cámara vacía, con el altavoz $S1$ en el punto $L1$, en la banda de frecuencia de 100 Hz . Aunque en la tabla solamente se muestran los dos primeros rayos, el fichero consta de 2677 rayos, con sus respectivos parámetros, en todo el rango de frecuencia (de 100 Hz a 5000 Hz).

Ray 1	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	Level In	Loss In	I/O Loss	Level Out	Loss Out
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.L1	11,6	4	-2,14	3,28	0,2	4	77,96	12,04			
Ray 2	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	Level In	Loss In	I/O Loss	Level Out	Loss Out
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz	100 Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.F17	3	1,03	-6,6	5,11	0,55	1,03	89,76	0,24	0,13	89,63	0,37
2.F94	6,6	2,26	-5,55	4,77	0	1,23	82,78	7,22	0,09	82,69	7,31
3.F3	30,5	10,49	1,47	2,47	3,64	8,23	69,36	20,64	0,09	69,27	20,73
4.F95	35,9	12,35	0,18	1,41	4,46	1,85	67,85	22,15	0,09	67,76	22,24
5.F13	42,8	14,7	-1,58	0,07	3,67	2,35	66,25	23,75	0,13	66,12	23,88
6.F17	64,1	22,03	-6,71	4,7	1,22	7,33	62,6	27,4	0,13	62,47	27,53
7.F94	74,7	25,67	-3,36	5,4	0	3,63	61,14	28,86	0,09	61,05	28,95
8.F7	83,5	28,68	-0,59	5,99	1,01	3,01	60,09	29,91	0,13	59,96	30,04
9.F1	91,7	31,5	1,58	4,44	1,95	2,82	59,14	30,86	0,13	59,01	30,99
10.F15	114,8	39,44	-4,72	0,41	4,61	7,93	57,06	32,94	0,13	56,93	33,07
11.F95	117,2	40,28	-5,5	0,57	4,89	0,84	56,74	33,26	0,09	56,65	33,35
12.F18	123,5	42,43	-7,57	0,98	4,48	2,15	56,2	33,8	0,09	56,11	33,89
13.F17	125	42,94	-7,58	1,48	4,39	0,51	56,01	33,99	0,13	55,88	34,12
14.F10	141,8	48,72	-4,58	6,3	3,29	5,79	54,78	35,22	0,13	54,65	35,35
15.F13	162,4	55,8	-1,53	0,06	1,95	7,07	53,47	36,53	0,13	53,34	36,66
16.F1	180,4	61,99	1,6	5,28	0,78	6,19	52,42	37,58	0,13	52,29	37,71
17.F5	180,5	62,02	1,59	5,3	0,78	0,03	52,28	37,72	0,09	52,19	37,81
18.F6	184,3	63,32	0,49	5,97	0,53	1,3	52,01	37,99	0,09	51,92	38,08
19.F96	192,4	66,1	-1,42	4,01	0	2,78	51,55	38,45	0,09	51,46	38,54
20.L1	195,5	67,15	-2,14	3,28	0,2	1,05	51,32	38,68			

Tabla 4.1 Ejemplo de parámetros obtenidos en la simulación de la cámara vacía, con el altavoz S1 en el punto L1, en 100 Hz.

Si se observa la Tabla XXII, se puede apreciar que el primer rayo del fichero se corresponde con el rayo directo; es decir, el rayo es emitido por el altavoz S1 y llega directamente al asiento de oyente L1, sin chocar contra ninguna superficie a lo largo de su recorrido. Sin embargo, el siguiente rayo, sufre hasta 19 reflexiones antes de llegar al punto de estudio, lo que evidentemente indica que los rayos no están ordenados por orden de llegada. De hecho, EASE almacena la información de los rayos del mismo modo que son emitidos por el altavoz, aleatoriamente. Por este motivo, lo primero que hace el programa implementado en Matlab en la etapa de procesado es ordenar todos los rayos del fichero por orden de llegada, facilitando así la localización de los mismos dentro del fichero.

En la Tabla 4.2, se muestran los primeros rayos ordenados por orden de llegada del fichero proporcionado por Matlab, correspondientes a la simulación de la cámara vacía, con el altavoz S1 en el punto L1.

Ray1	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	LevelIn	LossIn	I/O Loss	LevelOut	LossOut
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.L1	11,6	4	-2,14	3,28	0,2	4	77,96	12,04			
Ray9	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	LevelIn	LossIn	I/O Loss	LevelOut	LossOut
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.F96	10	3,42	-2,73	3,55	0	3,42	79,32	10,68	0,46	78,86	11,14
2.L1	11,9	4,1	-2,14	3,28	0,2	0,68	77,29	12,71			
Ray41	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	LevelIn	LossIn	I/O Loss	LevelOut	LossOut
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.F10	5,5	1,89	-4,42	6,29	0,73	1,89	84,45	5,55	0,13	84,32	5,68
2.L1	16,6	5,71	-2,14	3,28	0,2	3,82	74,73	15,27			
Ray37	Delay	Path	X	Y	Z	Distance	LevelIn	LossIn	I/O Loss	LevelOut	LossOut
Item:	[ms]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz	100Hz
0.S1	0	0	-5,7	4,92	1					90	
1.F10	5,6	1,92	-4,42	6,29	0,6	1,92	84,35	5,65	0,13	84,22	5,78
2.F96	14	4,82	-2,71	4,03	0	2,91	76,2	13,8	0,46	75,74	14,26
3.L1	16,8	5,78	-2,14	3,28	0,2	0,96	74,17	15,83			

Tabla 4.2 Ejemplo de fichero proporcionado por Matlab con los rayos ordenados por orden de llegada al punto *L1*.

Dado que, tanto la absorción de los materiales de la cámara, como la absorción del aire dependen de la frecuencia, se separó la información referente a los rayos en bandas de frecuencia facilitando así, el procesado de los datos. El programa realiza los mismos procesos para cada banda de frecuencia. En primer lugar, fragmenta toda la información obtenida mediante trazado de rayos durante los 300 milisegundos simulados, en tramos temporales de 10 milisegundos. De cada ventana temporal, se extrajeron los siguientes datos:

- Intervalo temporal: indica el tiempo donde empieza y donde acaba cada ventana de 10 *ms*, con respecto al tiempo total de análisis, 300 *ms*.
- Número de rayos del tramo: es el número de rayos que llegan al asiento de oyente en la ventana de 10 *ms*.
- Nivel global del tramo en decibelios: es la suma logarítmica del nivel de todos los rayos que llegan al asiento de oyente en la ventana de 10 *ms*.

- Camino medio en metros: es el promedio del trayecto recorrido de todos los rayos que llegan al asiento de oyente en la ventana de 10 *ms*.
- Superficies de procedencia de los rayos: se determinó cuáles son las superficies de la cámara de donde proceden los rayos antes de llegar al punto de estudio; es decir, cuál es la última superficie donde choca el rayo antes de terminar su trayectoria. El programa busca todas las superficies de procedencia dentro de la ventana de análisis, y obtiene el porcentaje que representa cada superficie sobre el total de superficies encontradas. Las superficies que tienen los dos porcentajes mayores son las que guarda el programa. De este modo, se puede comprobar si existe alguna superficie de procedencia que predomine sobre las demás.
- Porcentaje de las superficies de procedencia: este porcentaje expresa la proporción que representa cada una de las superficies de procedencia de la ventana de análisis en relación con el total.

Según la norma UNE-EN ISO 354, el tiempo de reverberación se obtiene mediante la medida del T_{20} , es decir, usando un margen de 20 *dB* para medir la caída de la energía acústica dentro de la sala. Por este motivo, se decidió realizar un análisis enfocado al nivel con el que llegan los rayos al punto de estudio en cada ventana temporal. Esta forma de presentar los datos permite apreciar cómo rayos que aportaban a la medida del tiempo de reverberación cuando la cámara estaba vacía, dejan de hacerlo al introducir el material absorbente en la cámara, ya que a efectos de este estudio, se consideró que todos los rayos que en la simulación llegaran con un nivel inferior a 20 *dB*, o más, con respecto al nivel máximo de la ventana de análisis, no aportaban información en la medida del tiempo de reverberación.

Para realizar el análisis por intervalos de niveles, cada ventana temporal se desglosó en cuatro tramos según la diferencia de nivel de energía acústica existente entre el rayo que llega al punto de estudio con el mayor nivel dentro del tramo y el nivel del resto de los rayos. Los intervalos de nivel dentro de los cuales se distribuyen los rayos son: Nivel máximo a -3 *dB*, -3 *dB* a -10 *dB*, -10 *dB* a -20 *dB* y más de -20 *dB*. La información global, anteriormente descrita, obtenida en cada ventana de 10 *ms*, se distribuye en los cuatro intervalos de nivel, obteniendo en cada intervalo el número de rayos, el nivel global y el camino medio.

El programa exporta en total 19 ficheros de texto por cada archivo procesado. Uno de ellos, contiene los datos originales, pero ordenados por orden de llegada al asiento de oyente, y los otros 18, contienen los datos obtenidos en cada una de las bandas de frecuencia.

En la Tabla 4.3, se puede ver un ejemplo de cómo proporciona el programa la información de cada ventana temporal tras realizar el procesamiento de los datos del fichero. En el ejemplo se pueden observar todos los parámetros correspondientes a los rayos emitidos por el altavoz *S1*, que llegaron al punto de estudio *L1*, dentro del intervalo temporal que abarca desde 91,6 *ms* hasta 101,6 *ms*, correspondientes a la simulación del modelo con el material dentro de la cámara en la banda de 800 *Hz*.

Intervalo temporal [ms]	91.6-101.6			
Número de rayos	134			
Nivel global [dB]	77,3			
Camino medio [m]	33,2			
Superficie	F96	F4		
Porcentaje [%]	41,0	11,9		
Intervalo de niveles	Nivel máximo a -3 dB	-3 dB a -10 dB	-10 dB a -20 dB	> -20 dB
Número de rayos	69	0	0	65
Nivel global [dB]	77,2	0	0	56,5
Camino medio [m]	17,1	0	0	16,2

Tabla 4.3 Ejemplo de la información proporcionada por el programa de Matlab en cada ventana temporal de 10 *ms*.

4.5. Análisis de los resultados de la simulación una vez procesados en Matlab.

Para estudiar las causas de dispersión que afectan a la medida del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, el presente trabajo se centró, principalmente, en analizar la evolución en frecuencia de los rayos que llegan a cada punto de oyente y de sus caminos medios en el interior de la cámara reverberante del CEIS, para las dos situaciones en las que se realizan las medidas del tiempo de reverberación; es decir, con la cámara vacía y con la muestra en su interior. De esta forma, se pudo observar la influencia que produce en el campo sonoro de la cámara reverberante, la introducción del material absorbente lana de roca de 50 *mm* de espesor de Rockwool. Además, también se estudió la procedencia de los rayos llegados a los puntos de estudio, observando las superficies de donde procedían los

rayos antes de terminar su trayectoria. De este modo, se pudo comprobar si existía o no, alguna superficie de procedencia que predominase sobre las demás.

El análisis de los ficheros proporcionados por el programa implementado en Matlab se realizó mediante el editor de hojas de cálculo Excel de Microsoft, facilitando así la visualización de la información.

4.5.1. Estudio de la evolución de los rayos y de los caminos medios.

El objetivo de este estudio es demostrar cómo la introducción de un material absorbente en el interior de una cámara reverberante, cambia las características del campo sonoro formado en su interior. Este cambio en el comportamiento de las cámaras reverberantes no se refleja en el cálculo del coeficiente de absorción sonora determinado a partir de los tiempos de reverberación medidos, por lo que puede ser una de las causas de dispersión de los resultados obtenidos mediante este método de ensayo. Además, las ecuaciones usadas en el cálculo del coeficiente de absorción sonora (ecuaciones 5 y 15), aplican una corrección por el efecto que produce la atenuación del aire en el interior de la cámara mediante el uso del término $4mV$, siendo m dicha atenuación. Debe tenerse en cuenta, que la atenuación del aire se aplica al camino recorrido por los rayos sonoros, pero en dichas fórmulas, se aplica al volumen de la cámara, el cual es el mismo cuando la cámara está vacía, que cuando el material es introducido en su interior. Por este motivo, en este trabajo se cuestiona el uso del volumen de la cámara en el término corrector, en lugar de otro parámetro más fiable como puede ser el camino recorrido por los rayos.

El estudio realizado se centra en determinar cuántos de todos los rayos emitidos desde un mismo altavoz que llegan a un mismo punto de la cámara, aportan realmente información en la medida del tiempo de reverberación. Como ya se ha explicado en el apartado 4.4. *“Procesado de los datos mediante Matlab”*, según la norma UNE-EN ISO 354, el tiempo de reverberación se obtiene mediante la medida del T_{20} , por lo que para descartar los rayos que no aportaban a la medida del tiempo de reverberación, se fijó un margen de 20 dB, considerando que todos los rayos que en la simulación realizada en EASE llegasen con un nivel inferior a 20 dB, o más, con respecto al nivel máximo de la ventana de análisis, no aportaban información en la medida del tiempo de reverberación.

Debido a la imposibilidad de aportar la extensa información analizada, en este capítulo solamente se presenta un resumen gráfico de los resultados de este estudio correspondientes a las simulaciones realizadas en el punto $L1$ con el altavoz $S1$. En el Anexo B se muestra la información correspondiente al resto de los puntos de estudio con sus respectivos altavoces.

Para poder tener una visión global en todo el rango de frecuencias del comportamiento de los rayos de cada simulación con el material en el interior de la cámara, se representó gráficamente la evolución temporal de los rayos que no aportaban información a las medidas del tiempo de reverberación, en las bandas de frecuencia en las que se producían cambios, obviando el resto de bandas que, además de no introducir información nueva, solo dificultaban la visualización de las gráficas.

La Figura 4.8, muestra la evolución temporal de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que llegaron al punto $L1$, y que no aportan información a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en el interior de la cámara.

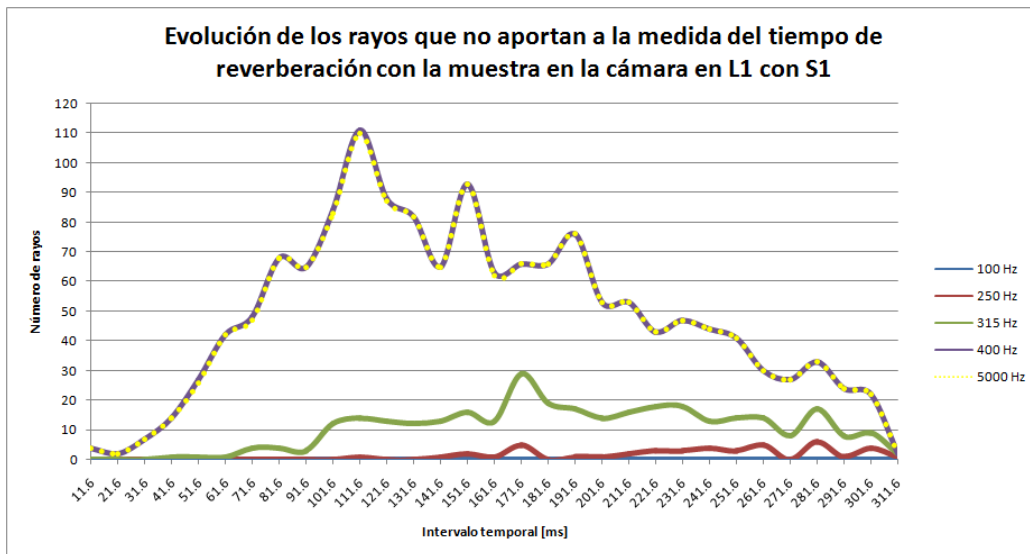


Figura 4.8 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto $L1$.

La gráfica de la Figura 4.8 resume el comportamiento de los rayos que no aportan en las medidas del tiempo de reverberación en los cinco puntos de estudio, independientemente del altavoz usado en las simulaciones. Se observa como el número de rayos que no aportan información a las medidas aumenta lentamente

desde la banda de 100 Hz hasta la de 315 Hz . Después, en 400 Hz , el número de rayos asciende bruscamente hasta alcanzar los valores máximos, que se mantienen prácticamente constantes, salvo ligeras variaciones, hasta la banda de 5000 Hz . Esto es debido, a que el material de la muestra, lana de roca de 50 mm de espesor de Rockwool, es muy absorbente a partir de los 400 Hz , teniendo unos coeficientes de absorción en torno a la unidad a partir de dicha banda. Las pequeñas variaciones que se producen en el rango de frecuencia de 400 Hz a 5000 Hz , son producidas por los ligeros cambios en la absorción del resto de superficies de la cámara reverberante.

Una vez analizado el comportamiento global de los rayos que no aportan a la medida del tiempo de reverberación en todas las bandas de frecuencia (Figura 4.8), se representaron las bandas de frecuencia de 315 Hz (Figura 4.9) y de 5000 Hz (Figura 4.10), para realizar un estudio más detallado de los rayos emitidos por cada altavoz, que reflejase cuántos de todos los rayos emitidos estarían contribuyendo en la medida del tiempo de reverberación y cuántos no.

En las Figuras 4.9 y 4.10, se observan todos los rayos emitidos por el altavoz $S1$ que llegaron al punto $L1$ en cada tramo de 10 ms , y cuántos del total de rayos emitidos llegaron al punto de estudio con un nivel igual, o superior, a 20 dB con respecto al nivel máximo de la ventana de análisis (rayos que no aportan), y cuántos llegaron con un nivel inferior (rayos que aportan). La Figura 4.9 presenta los resultados obtenidos en la banda de 315 Hz y la Figura 4.10 los de la banda de 5000 Hz .

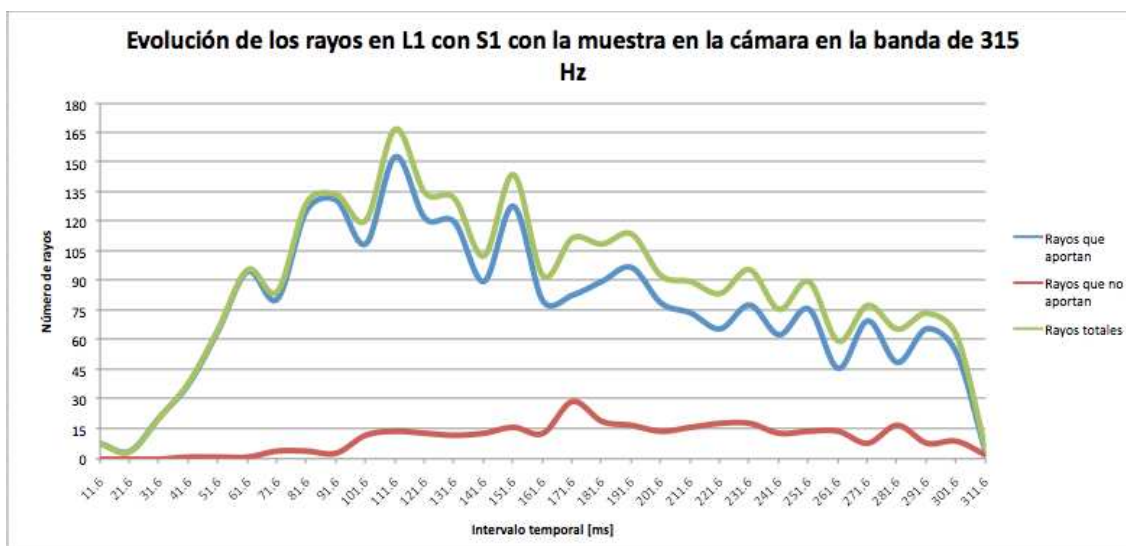


Figura 4.9 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz $S1$ en el punto $L1$ con la muestra en el interior de la cámara en la banda de 315 Hz .

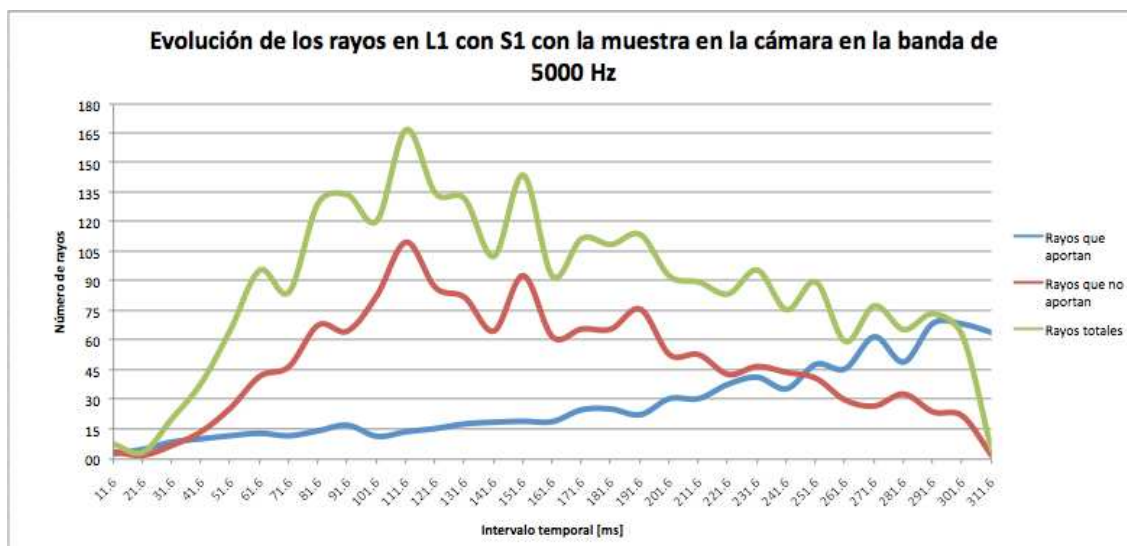


Figura 4.10 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* en el punto *L1* con la muestra en el interior de la cámara en la banda de 5000 Hz .

Analizando la evolución de los rayos de las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, se pueden extraer varias conclusiones. Si el material es muy absorbente, como sucede con el material estudiado, la pérdida de rayos que contribuyen a la medida del tiempo de reverberación es apreciable en prácticamente todo el rango de frecuencia, en este caso a partir de 400 Hz . Esto implica, por un lado que efectivamente se está perdiendo difusividad en el campo sonoro de la cámara al introducir un material absorbente, desde la banda de 400 Hz hasta la de 5000 Hz , en este caso. De hecho, se puede ver en la banda de 5000 Hz , Figura 4.10, como a partir de los 50 ms los rayos que no aportan información alcanzan valores dos veces, incluso tres veces, mayores que los rayos que realmente contribuyen en la medida. Por otro lado, resulta evidente que si disminuye el número de rayos que aporta información, también lo hará el camino recorrido por los mismos.

La Figura 4.11, muestra una visión global de la evolución temporal de los caminos medios de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que llegaron al punto *L1*, y que no aportan información a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en el interior de la cámara.

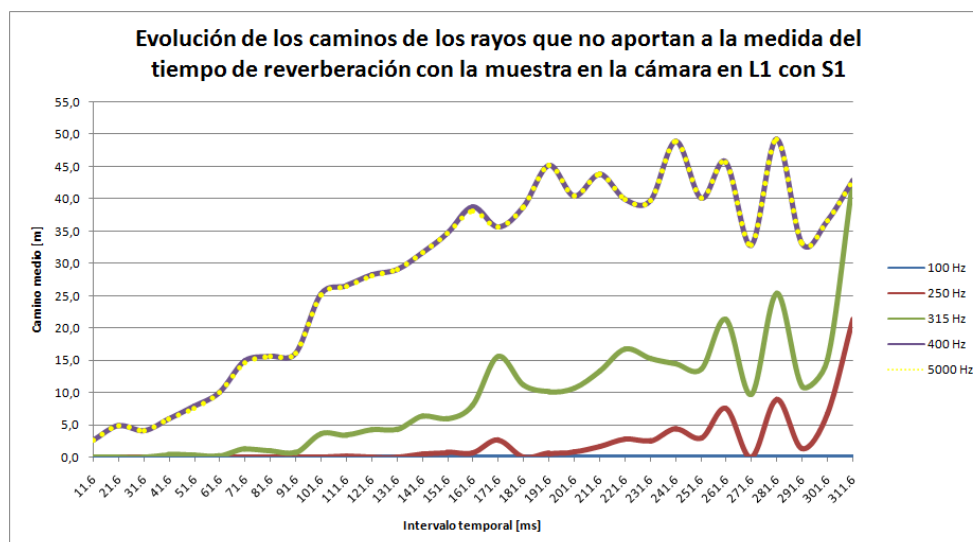


Figura 4.11 Evolución de los caminos de los rayos emitidos por el altavoz S1 que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto L1.

En la gráfica de la Figura 4.11, se puede comprobar como, efectivamente, los caminos medios de los rayos que no contribuyen en la medida del tiempo de reverberación, siguen la misma tendencia que los rayos representados en la Figura 4.8. Se observa como el camino recorrido por los rayos que no aportan información a las medidas aumenta lentamente desde la banda de 100 Hz hasta la de 315 Hz , ascendiendo bruscamente en 400 Hz hasta alcanzar los valores máximos, que se mantienen prácticamente constantes hasta la banda de 5000 Hz .

En las Figuras 4.12 y 4.13, se muestra la evolución del valor medio del camino recorrido por todos los rayos emitidos por el altavoz S1 que llegaron al asiento L1, cuando la muestra está colocada en el interior de la cámara en las bandas de frecuencia de 315 Hz y de 5000 Hz . Además, también se muestran los valores medios de los caminos recorridos por los rayos que aportan, y los que no aportan, a la medida del tiempo de reverberación.

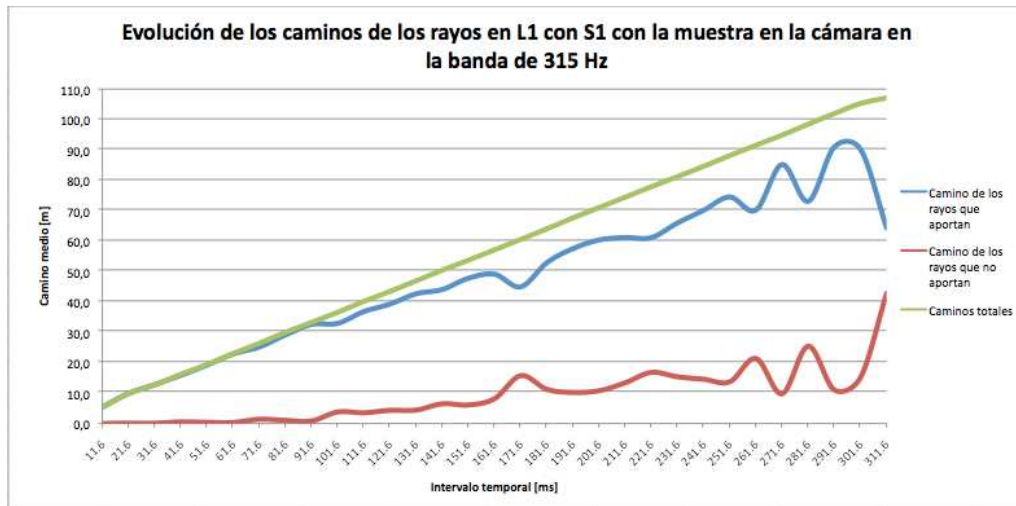


Figura 4.12 Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz $S1$ y que llegan al punto $L1$, con la muestra colocada en el interior de la cámara en la frecuencia de 315 Hz .

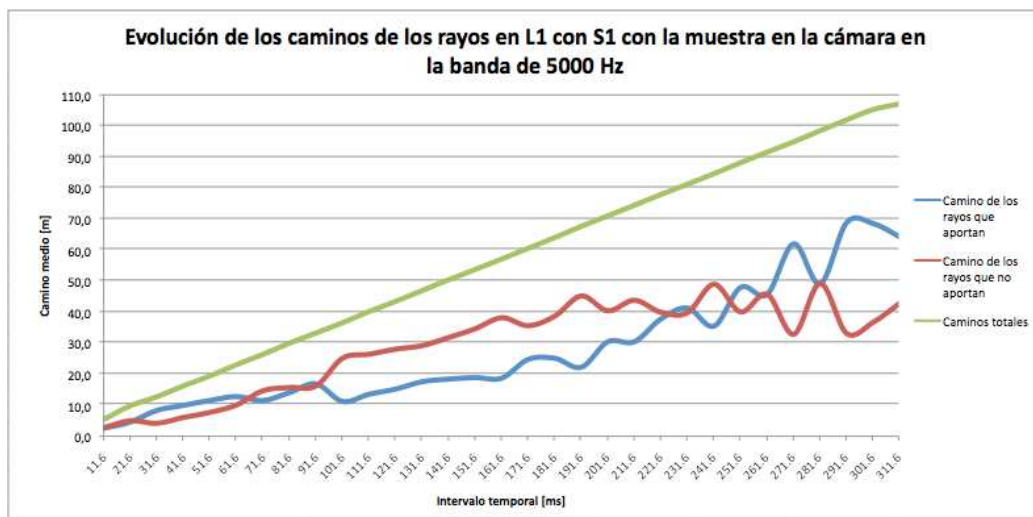


Figura 4.13 Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz $S1$ y que llegan al punto $L1$, con la muestra colocada en el interior de la cámara en la frecuencia de 5000 Hz .

Como se puede ver en la Figura 4.14, cuando la cámara está vacía, todos los rayos que llegan al punto de estudio contribuyen a la medida del tiempo de reverberación. Sin embargo, las Figuras 4.12 y 4.13 reflejan una de las consecuencias derivadas de la pérdida de rayos en la cámara tras la introducción del material absorbente. Esta consecuencia es la disminución del camino recorrido por los rayos antes de llegar a los puntos de estudio. Esto implica que la atenuación producida por el efecto del aire en el interior de la cámara tendrá un menor efecto en la propagación

de los rayos cuando se introduce la muestra absorbente en la cámara que cuando está vacía.



Figura 4.14 Evolución del valor medio del camino recorrido por los rayos emitidos por el altavoz *S1* y que llegan al punto *L1*, con la cámara vacía en la frecuencia de 5000 Hz .

A la vista de los resultados de este estudio, se puede concluir que la introducción de un material absorbente en el interior de la cámara reverberante reduce el número de rayos que se propagan en su interior, siendo mayor la reducción cuanto mayor es el coeficiente de absorción del material. Como consecuencia de la pérdida de rayos, además de reducirse la difusividad del campo sonoro de la cámara, también se reduce el valor medio del camino recorrido por los rayos. Teniendo en cuenta que el efecto de la absorción del aire es mayor cuanto mayor es la trayectoria recorrida por los rayos, se puede considerar más apropiado sustituir el volumen de la cámara del término $4mV$ de la ecuación de Sabine, por un término que refleje en el cálculo del coeficiente de absorción la reducción del camino recorrido por los rayos. El motivo es que el volumen, es constante independientemente de que se halle la muestra en la cámara o no, por lo que no refleja el cambio producido en la cámara antes y después de introducir el absorbente en las medidas del tiempo de reverberación.

4.5.2. Estudio de la procedencia de los rayos.

Como ya se ha explicado en el apartado 4.4. "*Procesado de los datos mediante Matlab*", el programa implementado en Matlab procesa la información obtenida en los trazados de rayos realizados en EASE, analizando la procedencia de los rayos que llegaron a cada punto de estudio en cada intervalo temporal de 10 ms . Para ello, el

programa determina cuál es la última superficie donde impacta cada rayo antes de terminar su trayectoria, proporcionando para cada intervalo de análisis, la superficie desde la cuál provienen la mayoría de los rayos. De este modo, se puede conocer de donde proceden los rayos que llegan a cada punto de estudio, y si existe alguna superficie de la cámara que predomine sobre las demás

En las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, se muestran las superficies de procedencia de los rayos obtenidas para cada punto de estudio, tanto para las simulaciones realizadas con la cámara vacía como con la muestra en su interior.

Punto L1 (Altura 0,20 m)					
Intervalo Temporal	Altavoz S1		Intervalo Temporal	Altavoz S2	
	Cámara con muestra	Cámara vacía		Cámara con muestra	Cámara vacía
	Superficie	Superficie		Superficie	Superficie
11.6-21.6	F96	F96	9.6-19.6	F96	F96
21.6-31.6	F96	F96	19.6-29.6	F96	F96
31.6-41.6	F96	F96	29.6-39.6	F96	F96
41.6-51.6	F96	F96	39.6-49.6	F96	F96
51.6-61.6	F96	F96	49.6-59.6	F96	F96
61.6-71.6	F96	F96	59.6-69.6	F96	F96
71.6-81.6	F96	F96	69.6-79.6	F96	F96
81.6-91.6	F96	F96	79.6-89.6	F96	F96
91.6-101.6	F96	F96	89.6-99.6	F96	F96
101.6-111.6	F96	F96	99.6-109.6	F96	F96
111.6-121.6	F96	F96	109.6-119.6	F96	F96
121.6-131.6	F96	F96	119.6-129.6	F96	F96
131.6-141.6	F96	F96	129.6-139.6	F96	F96
141.6-151.6	F96	F96	139.6-149.6	F96	F96
151.6-161.6	F96	F96	149.6-159.6	F96	F96
161.6-171.6	F96	F96	159.6-169.6	F96	F96
171.6-181.6	F96	F96	169.6-179.6	F96	F96
181.6-191.6	F96	F96	179.6-189.6	F96	F96
191.6-201.6	F96	F96	189.6-199.6	F96	F96
201.6-211.6	F96	F96	199.6-209.6	F96	F96
211.6-221.6	F96	F96	209.6-219.6	F96	F96
221.6-231.6	F96	F96	219.6-229.6	F96	F96
231.6-241.6	F96	F96	229.6-239.6	F96	F96
241.6-251.6	F96	F96	239.6-249.6	F96	F96
251.6-261.6	F96	F96	249.6-259.6	F96	F96
261.6-271.6	F96	F96	259.6-269.6	F96	F96
271.6-281.6	F96	F96	269.6-279.6	F96	F96
281.6-291.6	F96	F96	279.6-289.6	F96	F96
291.6-301.6	F96	F96	289.6-299.6	F96	F96
301.6-311.6	F96	F96	299.6-309.6	F96	F96
311.6-321.6	F96	F96	309.6-319.6	-	F96

Tabla 4.4 Superficies de procedencia del punto L1 en cada intervalo temporal.

Punto L2 (Altura 1,50 m)					
Intervalo Temporal	Altavoz S1		Intervalo Temporal	Altavoz S2	
	Cámara con muestra	Cámara vacía		Cámara con muestra	Cámara vacía
	Superficie	Superficie		Superficie	Superficie
6.3-16.3	F94	F94	17.5-27.5	F94	F94
16.3-26.3	F15	F15	27.5-37.5	F17	F17
26.3-36.3	F94	F94	37.5-47.5	F17	F17
36.3-46.3	F94	F94	47.5-57.5	F17	F17
46.3-56.3	F14	F14	57.5-67.5	F17	F17
56.3-66.3	F17	F17	67.5-77.5	F94	F94
66.3-76.3	F17	F17	77.5-87.5	F94	F94
76.3-86.3	F17	F17	87.5-97.5	F17	F17
86.3-96.3	F17	F17	97.5-107.5	F17	F17
96.3-106.3	F94	F94	107.5-117.5	F17	F17
106.3-116.3	F17	F17	117.5-127.5	F17	F17
116.3-126.3	F17	F17	127.5-137.5	F17	F17
126.3-136.3	F17	F17	137.5-147.5	F17	F17
136.3-146.3	F17	F17	147.5-157.5	F17	F17
146.3-156.3	F17	F17	157.5-167.5	F17	F17
156.3-166.3	F17	F17	167.5-177.5	F17	F17
166.3-176.3	F17	F17	177.5-187.5	F17	F17
176.3-186.3	F17	F17	187.5-197.5	F17	F17
186.3-196.3	F17	F17	197.5-207.5	F17	F17
196.3-206.3	F17	F17	207.5-217.5	F17	F17
206.3-216.3	F17	F17	217.5-227.5	F17	F17
216.3-226.3	F17	F17	227.5-237.5	F17	F17
226.3-236.3	F17	F17	237.5-247.5	F17	F17
236.3-246.3	F17	F17	247.5-257.5	F17	F17
246.3-256.3	F17	F17	257.5-267.5	F17	F17
256.3-266.3	F17	F17	267.5-277.5	F17	F17
266.3-276.3	F17	F17	277.5-287.5	F17	F17
276.3-286.3	F17	F17	287.5-297.5	F17	F17
286.3-296.3	F17	F17	297.5-307.5	F17	F17
296.3-306.3	F17	F17	307.5-317.5	F17	F17
			317.5-327.5	F94	F94

Tabla 4.5 Superficies de procedencia del punto *L2* en cada intervalo temporal.

Punto L3 (Altura 1,00 m)					
Intervalo Temporal	Altavoz S1		Intervalo Temporal	Altavoz S2	
	Cámara con muestra	Cámara vacía		Cámara con muestra	Cámara vacía
	Superficie	Superficie		Superficie	Superficie
16.7-26.7	F14	F14	4.4-14.4	F94	F94
26.7-36.7	F14	F14	14.4-24.4	F95	F95
36.7-46.7	F94	F94	24.4-34.4	F94	F94
46.7-56.7	F94	F94	34.4-44.4	F13	F13
56.7-66.7	F94	F94	44.4-54.4	F94	F94
66.7-76.7	F94	F94	54.4-64.4	F14	F14
76.7-86.7	F13	F13	64.4-74.4	F94	F94
86.7-96.7	F94	F94	74.4-84.4	F94	F94
96.7-106.7	F13	F13	84.4-94.4	F13	F13
106.7-116.7	F13	F13	94.4-104.4	F13	F13
116.7-126.7	F94	F94	104.4-114.4	F13	F13
126.7-136.7	F94	F13	114.4-124.4	F13	F13
136.7-146.7	F13	F13	124.4-134.4	F13	F13
146.7-156.7	F94	F13	134.4-144.4	F13	F13
156.7-166.7	F13	F13	144.4-154.4	F13	F13
166.7-176.7	F13	F13	154.4-164.4	F13	F94
176.7-186.7	F13	F13	164.4-174.4	F13	F13
186.7-196.7	F13	F94	174.4-184.4	F13	F13
196.7-206.7	F94	F13	184.4-194.4	F13	F13
206.7-216.7	F13	F13	194.4-204.4	F13	F13
216.7-226.7	F13	F13	204.4-214.4	F13	F13
226.7-236.7	F13	F13	214.4-224.4	F13	F13
236.7-246.7	F13	F13	224.4-234.4	F13	F13
246.7-256.7	F13	F13	234.4-244.4	F13	F13
256.7-266.7	F13	F13	244.4-254.4	F13	F13
266.7-276.7	F13	F13	254.4-264.4	F13	F13
276.7-286.7	F13	F13	264.4-274.4	F13	F13
286.7-296.7	F13	F13	274.4-284.4	F13	F13
296.7-306.7	F13	F13	284.4-294.4	F13	F13
306.7-316.7	F13	F13	294.4-304.4	F13	F13
316.7-326.7	F13	F13			

Tabla 4.6 Superficies de procedencia del punto *L3* en cada intervalo temporal.

Punto L4 (1,30 m)					
Intervalo Temporal	Altavoz S1		Intervalo Temporal	Altavoz S2	
	Cámara con muestra	Cámara vacía		Cámara con muestra	Cámara vacía
	Superficie	Superficie		Superficie	Superficie
18.7-28.7	F1	F1	10.4-20.4	F94	F94
28.7-38.7	F1	F1	20.4-30.4	F6	F6
38.7-48.7	F94	F94	30.4-40.4	F94	F94
48.7-58.7	F94	F94	40.4-50.4	F17	F17
58.7-68.7	F94	F94	50.4-60.4	F1	F1
68.7-78.7	F94	F94	60.4-70.4	F1	F1
78.7-88.7	F5	F1	70.4-80.4	F5	F5
88.7-98.7	F1	F1	80.4-90.4	F1	F94
98.7-108.7	F1	F1	90.4-100.4	F94	F94
108.7-118.7	F94	F1	100.4-110.4	F94	F94
118.7-128.7	F1	F1	110.4-120.4	F1	F1
128.7-138.7	F1	F1	120.4-130.4	F94	F1
138.7-148.7	F1	F1	130.4-140.4	F1	F1
148.7-158.7	F1	F1	140.4-150.4	F1	F1
158.7-168.7	F1	F1	150.4-160.4	F1	F94
168.7-178.7	F6	F1	160.4-170.4	F1	F1
178.7-188.7	F1	F1	170.4-180.4	F1	F1
188.7-198.7	F1	F94	180.4-190.4	F1	F5
198.7-208.7	F1	F1	190.4-200.4	F94	F5
208.7-218.7	F5	F1	200.4-210.4	F1	F1
218.7-228.7	F1	F1	210.4-220.4	F1	F1
228.7-238.7	F1	F5	220.4-230.4	F1	F1
238.7-248.7	F1	F1	230.4-240.4	F1	F1
248.7-258.7	F1	F1	240.4-250.4	F1	F1
258.7-268.7	F1	F1	250.4-260.4	F1	F1
268.7-278.7	F1	F1	260.4-270.4	F1	F2
278.7-288.7	F1	F1	270.4-280.4	F5	F1
288.7-298.7	F1	F1	280.4-290.4	F1	F1
298.7-308.7	F1	F1	290.4-300.4	F1	F1
308.7-318.7	F1	F7	300.4-310.4	F1	F2
318.7-328.7	-	F2			

Tabla 4.7 Superficies de procedencia del punto L4 en cada intervalo temporal.

Punto L5 (Altura 1,20 m)					
Intervalo Temporal	Altavoz S1		Intervalo Temporal	Altavoz S2	
	Cámara con muestra	Cámara vacía		Cámara con muestra	Cámara vacía
	Superficie	Superficie		Superficie	Superficie
5.5-15.5	F94	F94	17.1-27.1	F96	F96
15.5-25.5	F10	F10	27.1-37.1	F17	F17
25.5-35.5	F94	F94	37.1-47.1	F94	F94
35.5-45.5	F10	F10	47.1-57.1	F94	F94
45.5-55.5	F94	F94	57.1-67.1	F10	F10
55.5-65.5	F94	F94	67.1-77.1	F10	F10
65.5-75.5	F94	F94	77.1-87.1	F10	F10
75.5-85.5	F94	F94	87.1-97.1	F10	F10
85.5-95.5	F94	F94	97.1-107.1	F10	F10
95.5-105.5	F10	F94	107.1-117.1	F10	F10
105.5-115.5	F94	F94	117.1-127.1	F10	F10
115.5-125.5	F94	F17	127.1-137.1	F10	F10
125.5-135.5	F10	F10	137.1-147.1	F94	F10
135.5-145.5	F10	F10	147.1-157.1	F10	F10
145.5-155.5	F10	F94	157.1-167.1	F10	F10
155.5-165.5	F10	F10	167.1-177.1	F10	F10
165.5-175.5	F94	F94	177.1-187.1	F10	F10
175.5-185.5	F10	F10	187.1-197.1	F10	F10
185.5-195.5	F17	F10	197.1-207.1	F10	F10
195.5-205.5	F10	F10	207.1-217.1	F10	F10
205.5-215.5	F10	F10	217.1-227.1	F94	F10
215.5-225.5	F10	F10	227.1-237.1	F10	F10
225.5-235.5	F10	F10	237.1-247.1	F10	F10
235.5-245.5	F10	F10	247.1-257.1	F10	F10
245.5-255.5	F10	F10	257.1-267.1	F10	F10
255.5-265.5	F10	F10	267.1-277.1	F10	F10
265.5-275.5	F10	F10	277.1-287.1	F10	F10
275.5-285.5	F10	F10	287.1-297.1	F10	F10
285.5-295.5	F10	F10	297.1-307.1	F10	F10
295.5-305.5	F10	F10	307.1-317.1	F10	F10

Tabla 4.8 Superficies de procedencia del punto *L5* en cada intervalo temporal.

Como se puede apreciar en las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8, en cada punto de estudio predomina una superficie de la cámara que indica la dirección de procedencia de la mayoría de los rayos que llegaron a los puntos. La Figura 4.15 identifica la superficie de procedencia predominante correspondiente a cada punto de estudio.

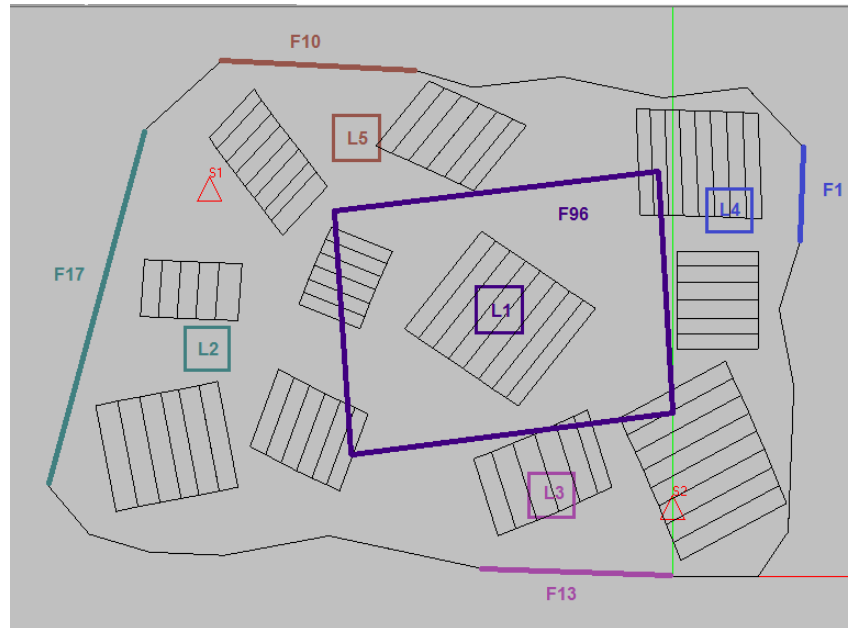


Figura 4.15 Superficies de procedencia correspondientes a cada punto de estudio.

Observando las Tablas 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 y 4.8 y la Figura 4.15, se puede ver como durante los 300 *ms* analizados, en los puntos *L2*, *L3*, *L4* y *L5* la última superficie en la que impactan la mayoría de los rayos simulados antes de finalizar sus recorridos es la pared más cercana a cada uno de ellos, y en menor medida la superficie *F94*, correspondiente con el suelo de la cámara reverberante. Sin embargo, en el punto *L1*, la mayoría de los rayos proceden de la muestra, superficie *F96*. Esto es debido a que el punto *L1*, se situó a en el centro del área ocupada por la muestra a tan solo 20 *cm* de altura.

5 Conclusiones y futuras líneas de investigación

5.1. Conclusiones.

El presente trabajo se ha centrado en analizar las causas de dispersión de la medida del coeficiente de absorción acústica en cámara reverberante, siguiendo las directrices de la norma UNE-EN ISO 354:2004. Se puede decir que el principal problema de este método de ensayo es la mala reproducibilidad obtenida entre los resultados de los distintos laboratorios. Aún así, el método descrito en la norma es el único estandarizado que permite medir la absorción de una forma que se aproxime más a las condiciones reales de instalación del material, teniendo en cuenta el efecto que estas puedan provocar.

Tras analizar la norma internacional UNE-EN ISO 354:2004, para la correcta aplicación del método de ensayo, se descubrió lo que parece un error cometido por el comité europeo de normalización (CEN) en el proceso de actualización de la versión anterior de la norma, la ya anulada UNE-EN 20354:1994. La norma antigua, no tenía en cuenta el efecto de la atenuación producida por las condiciones climáticas en el interior de la cámara. En otras palabras, no introducía el término $4mV$ en la ecuación de Sabine para el cálculo del coeficiente de absorción acústica. La atenuación producida por las condiciones climáticas aumenta con la frecuencia, llegando a tomar valores elevados a partir del tercio de octava de 3150 Hz, lo que hace disminuir el valor del área de absorción sonora equivalente calculado a medida que aumenta la frecuencia. Al elaborar la nueva norma, la UNE-EN ISO 354:2004, no se actualizaron unos nuevos valores para el área máxima de absorción sonora equivalente permitida, aunque sí se modificó la ecuación para el cálculo del área de absorción sonora equivalente de la cámara vacía A_1 , lo que da lugar a que cámaras que en realidad son muy absorbentes en alta frecuencia, estén cumpliendo los requisitos en cuanto a absorción sonora, cuando en realidad no debería ser el caso.

Con respecto a la aplicación de la norma internacional UNE-EN ISO 354:2004 en la realización de los cinco ensayos, se puede decir que la cámara de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM es más absorbente en las bandas de 4000 Hz y 5000 Hz de lo que la norma UNE-EN ISO 354 exige. Como consecuencia del exceso de absorción de la cámara, el coeficiente de absorción sonora del material obtenido es muy inferior al valor asignado al mismo material en la intercomparación AQUUS-ABSORPTION_1. Además, la desviación entre medidas del tiempo de reverberación en el mismo punto es mínima, por lo que se puede asumir que la baja repetibilidad entre los coeficientes de absorción sonora

resultantes de los cinco ensayos, es debida a una falta de difusión en el campo acústico de la cámara, lo que provoca que la desviación entre las medidas del tiempo de reverberación entre los diferentes puntos sea alta. Por tanto, se puede concluir que la cámara de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación de la UPM no proporciona resultados adecuados al aplicar la norma UNE-EN ISO 354, para realizar ensayos de medida de la absorción acústica.

En cuanto al número de magnitudes de entrada utilizadas en el cálculo de la incertidumbre asociada al coeficiente de absorción sonora, queda demostrado que la absorción del aire, magnitudes de entrada m_1 y m_2 , influyen en el cálculo de la incertidumbre, siendo mayor su efecto en alta frecuencia, a partir de la banda de 3150 Hz. Precisamente, es en alta frecuencia donde el coeficiente de atenuación sonora α tiene mayor peso en el cálculo del coeficiente de absorción sonora α_s . Además, si se observan las variaciones de las condiciones climáticas presentes en las realizaciones de los ensayos, se puede ver que variaciones en la humedad relativa afectan más a la incertidumbre que variaciones en la temperatura. Por tanto, es imprescindible incluir las magnitudes de entrada m_1 y m_2 en el cálculo de la incertidumbre del coeficiente de absorción sonora α_s , sobre todo, en situaciones en las cuales las condiciones ambientales en el interior de la cámara hayan sufrido una gran variación durante el proceso de realización de los ensayos.

Al incluir en la evaluación de la incertidumbre las magnitudes de entrada m_1 y m_2 , aumenta la complejidad del modelo matemático, por lo que la aplicación del método de Monte Carlo resulta más sencilla que la aplicación del enfoque clásico de la GUM. Los valores obtenidos por ambos métodos siguen la misma tendencia en todo el rango de frecuencia, siendo los valores proporcionados por el método de Monte Carlo más optimistas, ya que los valores de incertidumbre que proporciona son ligeramente inferiores a los proporcionados por el enfoque clásico de la GUM. En cuanto al proceso de validación, los resultados obtenidos por EGUM, no resultaron validados para la tolerancia numérica $\delta = 0,005$, mediante el método de Monte Carlo.

Del estudio de trazado de rayos realizado, se puede decir que la introducción de un material absorbente en el interior de una cámara reverberante reduce el número de rayos con nivel efectivo que se propagan en su interior, siendo mayor la reducción cuanto mayor es el coeficiente de absorción del material. Como consecuencia de la pérdida de rayos efectivos, además de reducirse la “difusividad” del campo sonoro de

la cámara, también se reduce el valor medio del camino recorrido por los rayos de nivel efectivo. Teniendo en cuenta que el efecto de la absorción del aire es mayor cuanto mayor es la trayectoria recorrida por los rayos, se puede considerar más apropiado sustituir el volumen de la cámara del término $4mV$ de la ecuación de Sabine, por un término que refleje en el cálculo del coeficiente de absorción la reducción del camino recorrido por los rayos efectivos. El motivo es que el volumen, es constante independientemente de que se halle la muestra en la cámara o no, por lo que no refleja el cambio producido en la cámara antes y después de introducir el absorbente en su interior.

5.2. Futuras líneas de investigación.

Como futuras líneas de investigación se propone estudiar con mayor detenimiento la evaluación de la incertidumbre, profundizando en las dos metodologías empleadas y analizando los motivos por los cuáles los resultados del enfoque clásico de la GUM no resultan validados. Además, como se ha visto en el capítulo 3 del presente trabajo, las condiciones ambientales influyen en la incertidumbre de medida asociada al coeficiente de absorción sonora, por tanto, se podría analizar la influencia de variaciones concretas de temperatura y/o de humedad relativa en el valor de la incertidumbre.

También se propone estudiar si es posible sustituir el volumen de la cámara del término $4mV$ de la ecuación de Sabine, por otro parámetro que refleje el cambio producido en la cámara antes y después de introducir el absorbente en las medidas del tiempo de reverberación, y si este cambio permite minimizar la dispersión de los resultados obtenidos entre laboratorios aplicando este método de ensayo.

ANEXOS

ANEXO A

Medida del coeficiente de absorción acústica de los difusores

Para realizar el estudio de trazado de rayos del modelo en EASE de la cámara reverberante del Centro de Ensayos, Innovación y Servicios (CEIS) fue necesario determinar el coeficiente de absorción acústica de los difusores de PVC suspendidos en el techo de la cámara del CEIS, para poder asignar su absorción en el modelo de la cámara de EASE.

Debido a que los difusores de la cámara del CEIS son del mismo material que los difusores de la cámara reverberante de la ETSIST, para obtener unos valores aproximados de su coeficiente de absorción acústica, se realizó un ensayo en la cámara reverberante de la ETSIST siguiendo el método ya descrito en el apartado 2.3. “*Método de ensayo según UNE-EN ISO 354:2004*”, mediante medidas del tiempo de reverberación de la cámara vacía, y de la cámara con la muestra a ensayar en su interior. Al ser los propios difusores de la cámara los objetos a ensayar, se usó el promedio de las medidas del tiempo de reverberación de la cámara vacía obtenidas en los ensayos del material lana de roca de Rockwool, como medidas del tiempo de reverberación con los difusores en el interior de la cámara. Para obtener el tiempo de reverberación de la cámara vacía, se descolgaron 5 de los 19 difusores de los que dispone la cámara, y después se realizaron las medidas.

A partir de los tiempos de reverberación medidos, se calcularon los coeficientes de absorción acústica de los difusores mediante las ecuaciones de la norma UNE-EN ISO 354:2004, cuyos resultados se pueden ver en la Tabla A.1.

Frecuencia [Hz]	$\alpha_{\text{difusores}}$
100	0,00
125	0,03
160	0,04
200	0,06
250	0,06
315	0,04
400	0,04
500	0,03
630	0,01
800	0,01
1000	0,02
1250	0,02
1600	0,02
2000	0,02
2500	0,01
3150	0,03
4000	0,04
5000	0,00

Tabla A.1 Coeficiente de absorción acústica de los difusores de PVC de la cámara de la ETSIST.

ANEXO B

Evolución de los rayos en los distintos puntos de estudio

Este anexo completa la información dada en el apartado 4.5.1. “*Estudio de la evolución de los rayos y los caminos medios*”. El estudio trata de demostrar cómo la introducción de un material absorbente en el interior de una cámara reverberante, cambia las características del campo sonoro formado en su interior. Para ello, se determinó, a partir de las simulaciones en EASE, cuántos de todos los rayos emitidos desde un mismo altavoz que llegan a un mismo punto de la cámara, aportan realmente información en la medida del tiempo de reverberación, tanto para la cámara vacía, como cuando se introduce el material absorbente en su interior.

En las Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 y B.10, se puede ver la evolución de los rayos que no aportan información en la medida del tiempo de reverberación con la muestra absorbente en el interior de la cámara, en las distintas bandas de frecuencia. En las gráficas se muestra el número total de rayos emitidos por cada altavoz que llegaron a cada uno de los puntos de estudio, y cuántos de esos rayos llegaron con un nivel 20 *dB* inferior con respecto al nivel máximo de cada intervalo temporal, y que por tanto se considera que no aportan información en la medida del tiempo de reverberación.

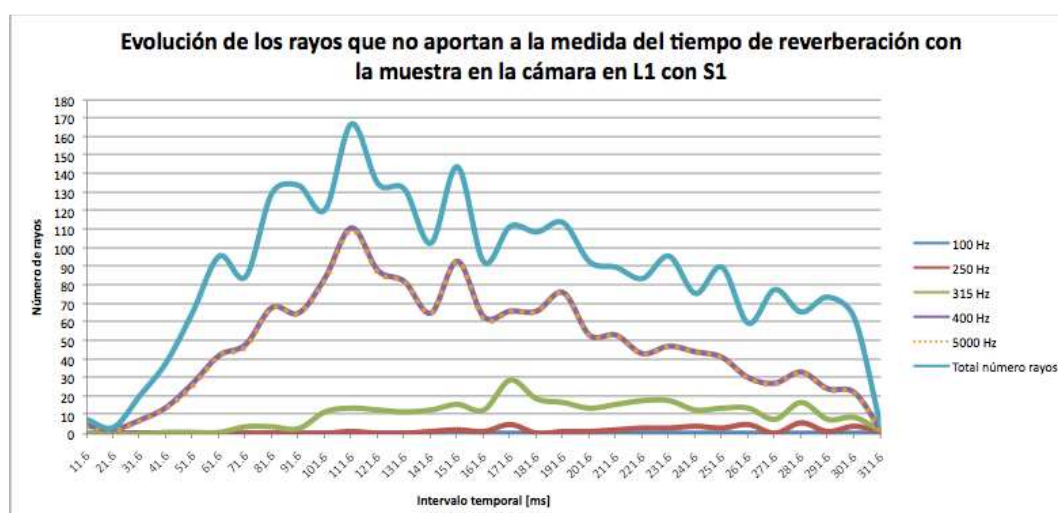


Figura B.1 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz S1 que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto L1.

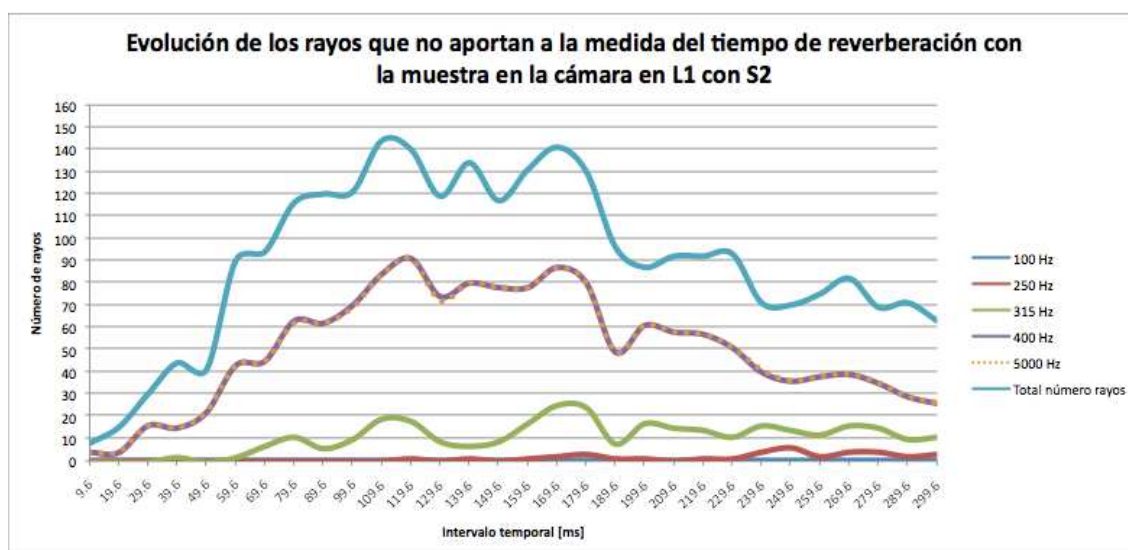


Figura B.2 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S2* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L1*.

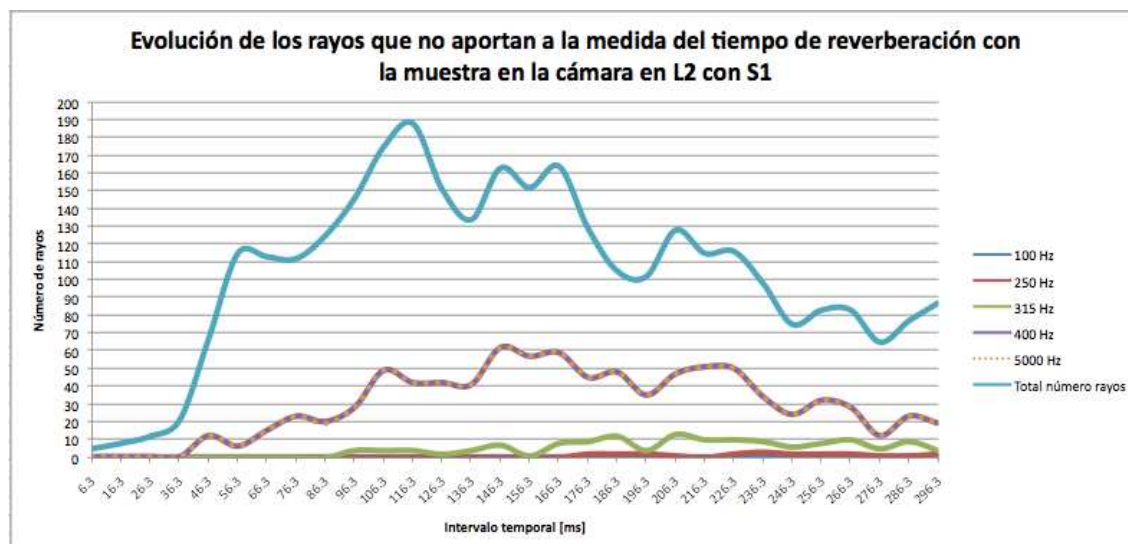


Figura B.3 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L2*.

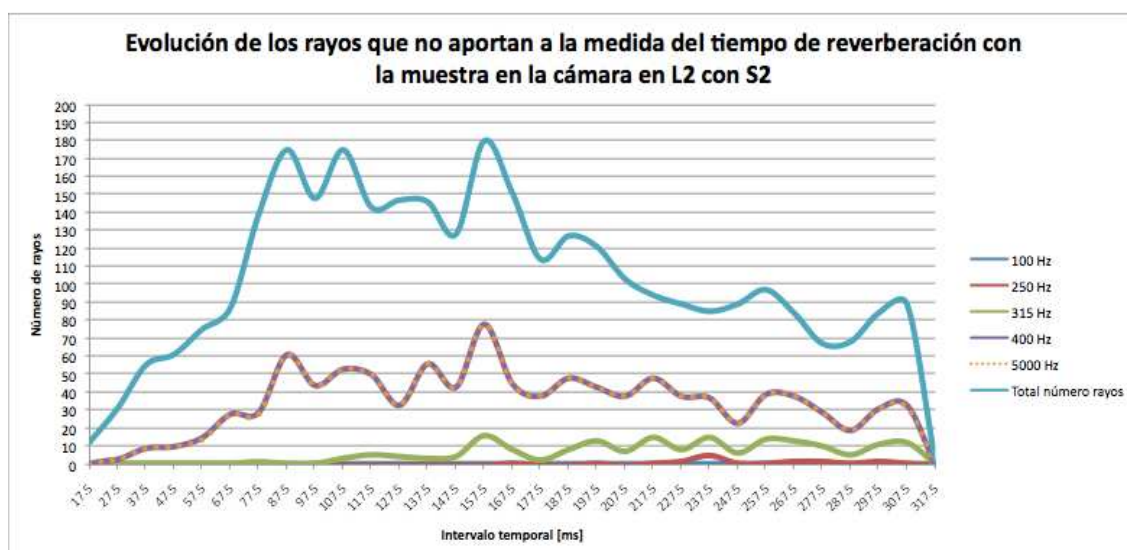


Figura B.4 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S2* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L2*.

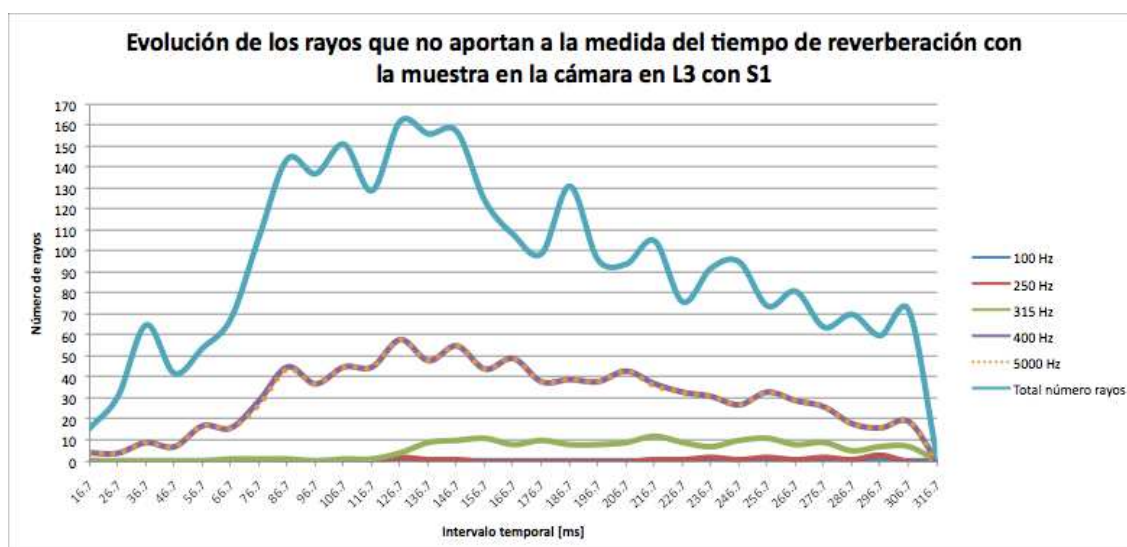


Figura B.5 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L3*.

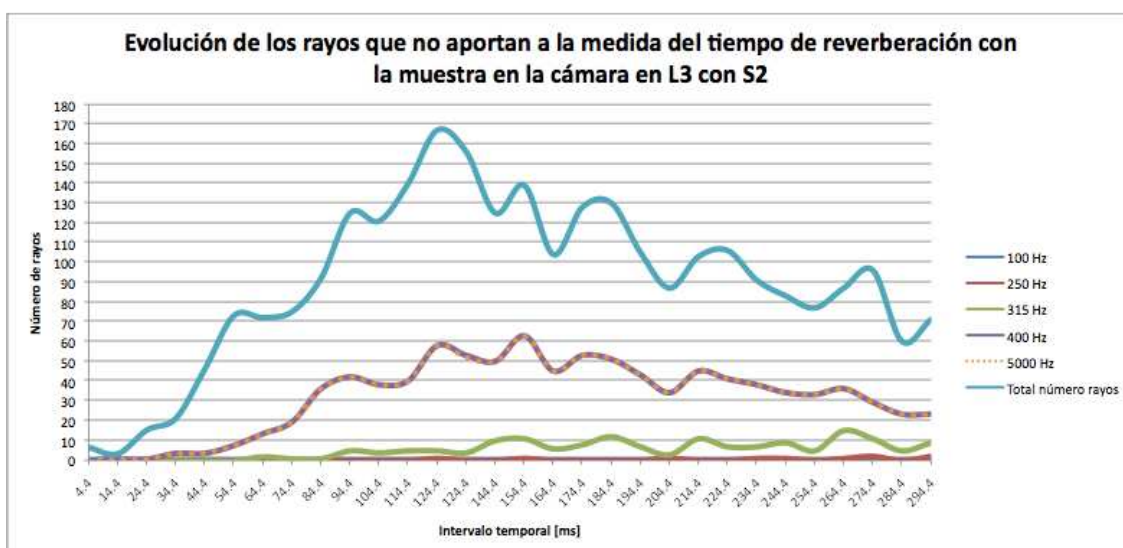


Figura B.6 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S2* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L3*.

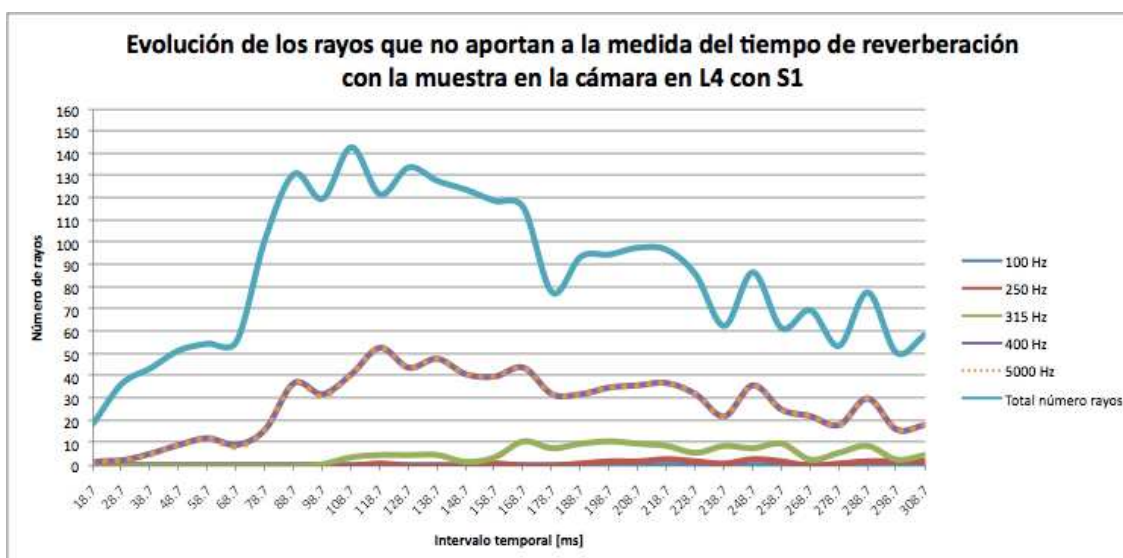


Figura B.7 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L4*.

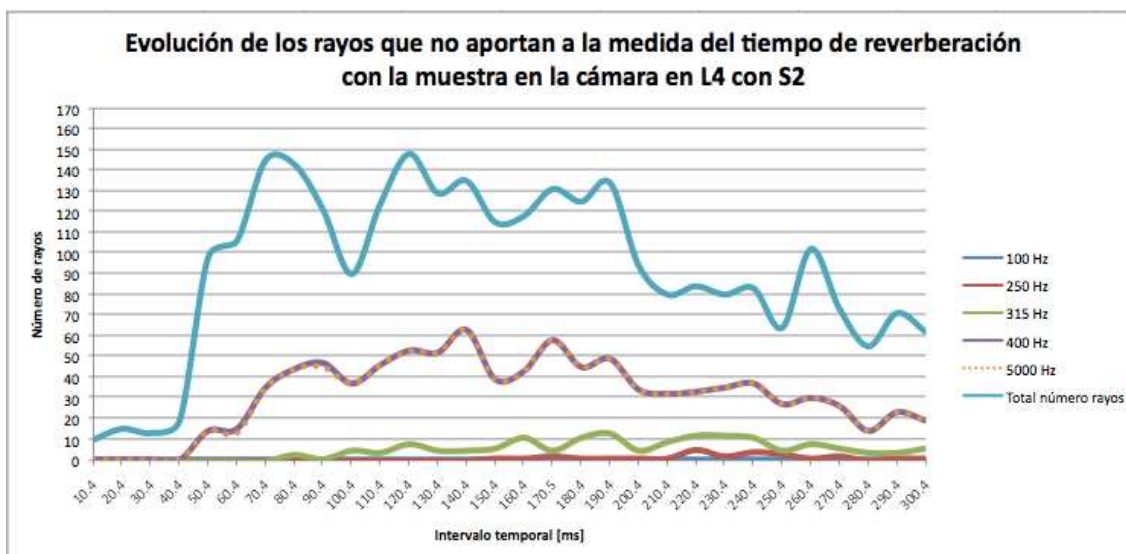


Figura B.8 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S2* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L4*.

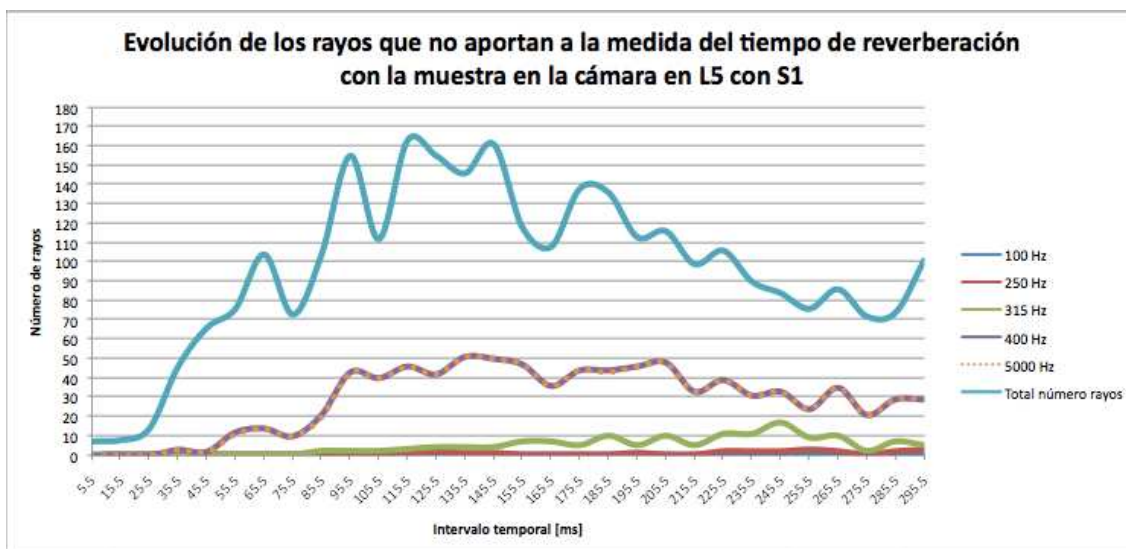


Figura B.9 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L5*.

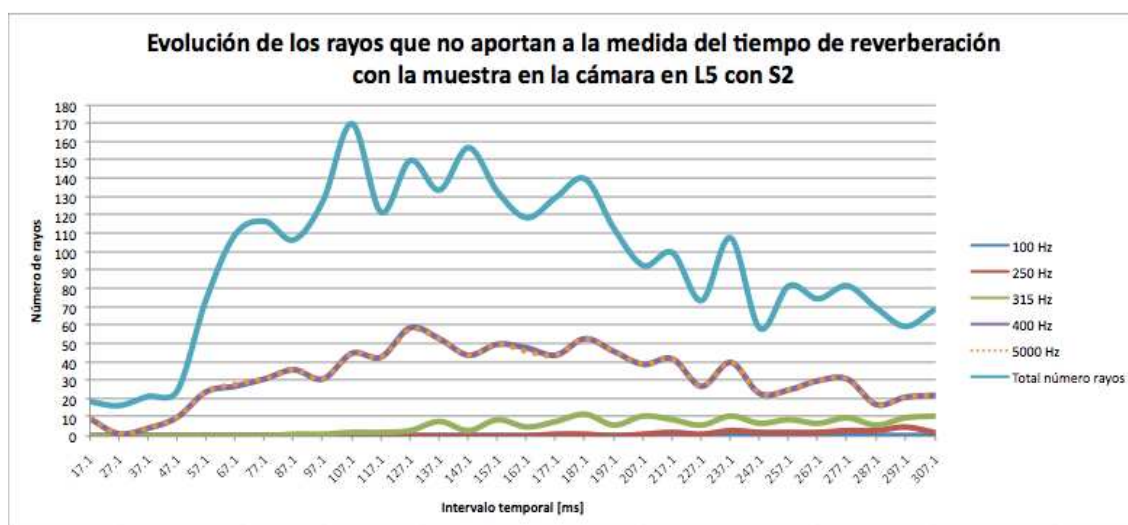


Figura B.10 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S2* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la muestra en la cámara en el punto *L5*.

Como se puede ver en las Figuras B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 y B.10, el comportamiento de los rayos es similar en cada uno de los 5 puntos analizados, independientemente de cuál sea el altavoz utilizado en las simulaciones. El número de rayos que no aportan a la medida del tiempo de reverberación aumenta lentamente desde los 100 Hz hasta los 315 Hz . Después, aumentan bruscamente en la banda de 400 Hz , en la que alcanzan los valores máximos, que se mantienen prácticamente constantes hasta la banda de 5000 Hz . Solamente se representaron dichas bandas, ya que en el resto de bandas de frecuencia analizadas los resultados obtenidos no aportaban información nueva con respecto a la banda anterior. De esta forma, se facilita la visualización de los resultados obtenidos.

En cuanto a la evolución de los rayos que no aportan en la medida del tiempo de reverberación con la cámara vacía, los resultados obtenidos son exactamente los mismos independientemente del punto de la cámara analizado y del altavoz utilizado en las simulaciones. Por tanto, solamente se muestra el número total de rayos emitidos por el altavoz *S1* que llegaron al punto *L1* con la cámara vacía, y cuántos de esos rayos llegaron con un nivel 20 dB inferior con respecto al nivel máximo de cada intervalo temporal, y que por tanto se considera que no aportan información en la medida del tiempo de reverberación (Figura B.11).



Figura B.11 Evolución de los rayos emitidos por el altavoz *S1* que no aportan a la medida del tiempo de reverberación con la cámara vacía en el punto *L1*.

Como se puede ver en la Figura B.11, todos los rayos emitidos por el altavoz *S1* que llegan al punto *L1*, contribuyen en la medida del tiempo de reverberación. Cabe destacar, que solamente se representaron los resultados de las bandas de frecuencia de 100 Hz y de 5000 Hz , puesto que en el resto de las bandas, los resultados son los mismos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] UNE-EN ISO 354:2004 — Acústica. “Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”.
- [2] UNE-EN 20354:1994 — Acústica. “Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”.
- [3] ISO 9613-1:1993 — Acoustics. “Attenuation of sound during propagation outdoors. Part 1: Calculation of the absorption of sound by the atmosphere”.
- [4] ACUSTILAB y RPS-Qualitas. “Informe final global de la intercomparación AQUUS-ABSORPTION_1”, 25 de febrero de 2013.
- [5] Centro Español de Metrología. “Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida”, 2008.
- [6] Centro Español de Metrología. “Evaluación de datos de medición — Suplemento 1 de la Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida — Propagación de distribuciones aplicando el método de Monte Carlo”, 2010.
- [7] Gustavo Delgado. “Metodología para la implementación del método adaptativo de Monte Carlo en la evaluación de la incertidumbre de medición, utilizando el cálculo simbólico Maple. Aplicación a un experimento sencillo”. UNAN-León, Editorial Universitaria. Universitas, Volumen 3, Número 2, 2009, 22-32, ISSN 2071-2575.
- [8] Helena Alves Santos. “Unidad didáctica sobre el programa de simulación acústica EASE”. Proyecto Fin de Carrera, Octubre 2006.
- [9] Renkus-Heinz. “EASE 4.3 User’s guide & Tutorial”, 2009.
- [10] <http://www.mathworks.es/es/help/matlab/index.html>
- [11] M. Nabuco, R. A. Tenenbaum and A. Schmitz. “Experimental investigation about possible sources of uncertainty for sound absorption measurements in reverberation chambers”. Proceedings of INCE Symposium Managing uncertainties in noise measurements and prediction, Le Mans, France, 27-29 June, 2005.
- [12] M. L. S. Vercammen. “Improving the accuracy of sound absorption measurement according to ISO 354”. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, ISRA 2010, Melbourne, Australia, 29-31 August, 2010.

- [13] D'Antonio et al. "The state of the art in the measurement of acoustical coefficients", 161st Meeting Acoustical Society of America, Seattle, Washington, 23-27 May, 2011.